

Trabajo de Fin de Grado

Grado en Ingeniería de Organización Industrial

Diseño y aplicación de modelos de simulación discreta en sistemas de fabricación flexibles. Aplicación a una empresa de fabricación de electrodos

Autor: Luis de Lara Prats

Tutor: Dr. Ignacio Eguía Salinas

Dep. de Organización Industrial y Gestión de
Emrpesas I
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Sevilla, 2016



Trabajo de Fin de Grado
Grado en Ingeniería de Organización Industrial

**Diseño y aplicación de modelos de simulación
discreta en sistemas de fabricación flexibles.
Aplicación a una empresa de fabricación de
electrodos**

Autor:

Luis de Lara Prats

Tutor:

Dr. Ignacio Eguía Salinas

Profesor titular

Dep. de Organización Industrial y Gestión de Empresas I

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2016

RESUMEN

En este trabajo de fin de grado se aborda el problema de la programación y control de la producción para una empresa de fabricación con una configuración de taller tipo Job shop mediante técnicas de simulación de eventos discretos.

El objetivo principal del trabajo es modelar y ejecutar simulaciones para analizar cuál es la forma más eficiente a la hora de procesar los pedidos, por lotes de productos o disgregado de lotes en piezas y cuál es la secuencia antes de entrar a las estaciones para ser procesadas.

Dichas estaciones poseen distintos tiempos de procesado y tiempo de Set Up para cada tipo de pieza. Cada tipo de pieza posee secuencias alternativas de procesado.

Este análisis operativo de la producción se basa en los resultados un análisis táctico anterior en el que se equilibraban las cargas de las estaciones así como la vida útil de las herramientas empleadas; por esta razón, se utiliza como punto de partida en este trabajo el reparto entre las dos rutas posibles para que se respete la carga de las máquinas.

En las simulaciones se utilizan los datos de una aplicación real en una fábrica de electrodos con un horizonte de planificación semanal.

ÍNDICE

RESUMEN	7
ÍNDICE	9
ÍNDICE DE TABLAS	13
ÍNDICE DE FIGURAS	15
ÍNDICE DE GRÁFICOS	17
1. INTRODUCCIÓN	19
1.1 INTRODUCCIÓN	19
1.2 OBJETIVOS	21
1.3 ESTRUCTURA DEL TRABAJO	22
2. LA PLANIFICACIÓN ESTRATÉGICA DE LA PRODUCCIÓN.	24
2.1 INTRODUCCIÓN	24
2.2 EL CONCEPTO DE PLANIFICACIÓN DE LA PRODUCCIÓN	24
2.2.1 PLANIFICACIÓN DE LA CAPACIDAD	25
2.2.2 ESTRATEGIAS DE FABRICACIÓN	26
2.3 LA PRODUCCIÓN DE LA EMPRESA	27
2.4 SELECCIÓN Y DISEÑO DE PROCESO.	28
2.5 PRODUCCIÓN AUTOMATIZADA: SISTEMAS DE FABRICACIÓN FLEXIBLE (FMS).	29
2.6 CARGA DE MÁQUINAS Y SELECCIÓN DE PEDIDOS.	29
2.6.1 SOLUCIÓN DEL PROBLEMA EN ENTORNOS DE SFF.	31
2.6.1.1 SOLUCIÓN CONJUNTA AL PROBLEMA DE CARGA DE MÁQUINAS Y SELECCIÓN DE PRODUCTOS.	32
3. PROGRAMACIÓN Y CONTROL DE LA PRODUCCIÓN.	33
3.1 PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE UN SISTEMA DE PRODUCCIÓN.	33
3.2 CUMPLIMIENTO DE LAS ENTREGAS.	34
3.2.1 LEAN MANUFACTURING.	35
3.2.2 JUST IN TIME (JIT).	38
3.3 PROGRAMACIÓN, SECUENCIACIÓN Y REGLAS HEURÍSTICAS.	40
3.4 EL CONCEPTO DEL JOB SHOP.	43
3.4.1 SOLUCIONES A ENTORNOS JOB SHOP.	45
4. SIMULACIÓN	54
4.1 CONCEPTOS BÁSICOS DE SIMULACIÓN.	54
4.1.1 DEFINICIONES	55
4.1.2 MODELOS DE SIMULACIÓN.	56
4.1.3 CAMPOS DE APLICACIÓN DE LA SIMULACIÓN.	58
4.2 PROYECTOS DE SIMULACIÓN.	59
4.2.1 ETAPAS DE UN PROYECTO DE SIMULACIÓN.	59
4.2.2 VENTAJAS E INCONVENIENTES.	65
4.3 SIMULACIÓN DE SISTEMAS DINÁMICOS DE EVENTOS DISCRETOS.	67
4.3.1 INTRODUCCIÓN.	67
4.3.2 CARACTERÍSTICAS.	67
4.3.3 ELEMENTOS DE UN MODELO DE SIMULACIÓN DISCRETA.	68
4.4 ARENA.	69
4.4.1 MÓDULOS BÁSICOS.	70
4.4.2 MÓDULOS AVANZADOS.	74
4.4.3 ESTACIONES Y SECUENCIAS.	76

5.	DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.	78
5.1	INTRODUCCIÓN	78
5.2	DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA.	78
5.3	DESCRIPCIÓN DEL PRODUCTO.	79
5.3.1	ELECTRODOS.	80
5.4	SITUACIÓN ACTUAL DE LA LÍNEA DE PRODUCCIÓN.	82
5.4.1	INTRODUCCIÓN.	82
5.4.2	CONFIGURACIÓN DE LA LÍNEA DE PRODUCCIÓN.	83
5.4.2.1	MAQUINARIA.	83
5.4.2.2	LAYOUT.	84
5.4.2.3	PERSONAL.	85
5.4.3	PROCESO DE FABRICACIÓN.	85
5.5	DESCRIPCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA.	88
5.6	DEFINICIÓN CONCEPTUAL DEL PROBLEMA.	90
6.	SIMULACIÓN DEL PROBLEMA.	91
6.1	INTRODUCCIÓN.	91
6.2	ENUNCIADO DEL PROBLEMA.	91
6.3	DATOS DEL PROBLEMA.	92
6.4	INTRODUCCIÓN DE DATOS EN ARENA.	96
6.4.1	MODELOS POR LOTES.	97
6.4.1.1	MODELO POR LOTES, ORDEN MAYOR PRIORIDAD, COLAS FIFO.	103
6.4.1.2	MODELO POR LOTES, ORDEN MAYOR PRIORIDAD, COLAS LVA ORDEN.	104
6.4.1.3	MODELO POR LOTES, ORDEN MENOR TIEMPO TOTAL DEL LOTE CON SET UP, COLAS FIFO.	104
6.4.1.4	MODELO POR LOTES, ORDEN MENOR TIEMPO TOTAL DEL LOTE CON SET UP, COLAS LVA ORDEN.	105
6.4.1.5	MODELO POR LOTES, ORDEN MENOR TIEMPO TOTAL DEL LOTE CON SET UP, COLAS LVA TIEMPO EN ESTACIÓN.	106
6.4.2	MODELOS POR LOTES DE TRANSFERENCIA UNITARIA.	107
6.4.2.1	MODELO POR LOTES DE TRANSFERENCIA UNITARIA, ORDEN MAYOR PRIORIDAD, COLAS LVA ORDEN.	113
6.4.2.2	MODELO POR LOTES DE TRANSFERENCIA UNITARIA, ORDEN MAYOR PRIORIDAD, COLAS LVA TIEMPO EN ESTACIÓN.	113
6.4.2.3	MODELO POR LOTES DE TRANSFERENCIA UNITARIA, ORDEN MAYOR PRIORIDAD, COLAS FIFO.	114
7.	RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN.	115
7.1	INTRODUCCIÓN	115
7.2	MODELOS POR LOTES.	115
7.3	MODELOS POR LOTES DE TRANSFERENCIA UNITARIA.	118
7.4	COMPARATIVA MODELOS.	121
8.	CONCLUSIONES	124
8.1	CONCLUSIONES	124
8.2	LÍNEAS FUTURAS DE TRABAJO.	125
9.	REFERENCIAS.	126
9.1	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.	126
ANEXOS		129

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Selección del tipo de proceso	28
Tabla 2 Autores y métodos de resolución al problema de carga de máquinas.	31
Tabla 3 Autores y métodos aplicados al problema selección de pedidos y carga de máquinas.	32
Tabla 4 Reglas de despacho seleccionadas	49
Tabla 5 Demanda del período	92
Tabla 6 Características de las operaciones de cada pedido	93
Tabla 7 Tempos de Set Up de cada pedido en cada máquina	95
Tabla 8 Selección de rutas y reparto de piezas	95
Tabla 9 Lista de lotes	96
Tabla 10 Ordenación por prioridad	103
Tabla 11 Ordenación por tiempo total de fabricación	105
Tabla 12 Resultados, modelos por lotes	116
Tabla 13 Registro de salida de lotes modelos 1, 2 y 3	117
Tabla 14 Registro de salida de lotes modelos 4 y 5	118
Tabla 15 Resultados, modelos por lotes de transferencia unitaria	120
Tabla 16 Registro de salida de las piezas modelos por transferencia unitaria	145

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Organización de los departamentos con la producción (Canca, Sistemas productivos, 2014)	21
Figura 2 Caso práctico estructura de vecindad	46
Figura 3 Subproblema de secuenciación	46
Figura 4 Subproblema de asignación	46
Figura 5 Rendimiento de cada regla de despacho con WIP	49
Figura 6 Rendimiento de cada regla con respecto al tiempo de espera en cola	50
Figura 7 Rendimiento de cada regla según makespan y tiempo de espera	50
Figura 8 Ranking de reglas de despacho	51
Figura 9 Rendimiento de cada regla de despacho híbrida con WIP	51
Figura 10 Rendimiento de cada regla híbrida respecto al tiempo de cola y makespan	52
Figura 11 Ranking reglas de despacho híbridas	53
Figura 12 Métodos de análisis	54
Figura 13 Etapas de un proyecto de simulación.	60
Figura 14 Validación y verificación del modelo	63
Figura 15 Realimentación del modelo	64
Figura 16 Módulo Create	70
Figura 17 Módulo assign	70
Figura 18 Módulo Process	71
Figura 19 Módulo Decide	71
Figura 20 Módulo Batch	72
Figura 21 Módulo Separate	72
Figura 22 Módulo Record	73
Figura 23 Módulo Dispose	73
Figura 24 Módulo Hold	74
Figura 25 Módulo Signal	74
Figura 26 Módulo Match	75
Figura 27 Módulo ReadWrite	75
Figura 28 Módulo Station	76
Figura 29 Módulo Route	77
Figura 30 Módulo Sequence	77
Figura 31 Ejemplo de electrodos para la Soldadura por Resistencia	80
Figura 32 Ejemplos de otras geometrías de electrodos	81
Figura 33 Ejemplo maquinaria. Centro HAAS	84
Figura 34 Configuración layout de la empresa	84

Figura 35 Recepción de órdenes de pedidos de los clientes	86
Figura 36 Ejemplo de orden de trabajo a fabricar	86
Figura 37 Ejemplo de hoja viajera que acompaña al lote	87
Figura 38 Modelo por lotes básico	97
Figura 39 Create, módulo inicial	97
Figura 40 Separate, creación de lotes	98
Figura 41 ReadWrite, lectura de datos	98
Figura 42 Assign, asignación de secuencia a lotes	99
Figura 43 Sequence, definición de secuencias y parámetros	100
Figura 44 Route, inicio de secuencias	100
Figura 45 Lista de routes	101
Figura 46 Estación 1	101
Figura 47 Máquina 1	101
Figura 48 Fase final del sistema	102
Figura 49 File, lectura y escritura de datos	102
Figura 50 Colas modelo FIFO	104
Figura 51 Colas modelo LVA (Orden)	104
Figura 52 Modelo por lotes LVA (TEstación)	106
Figura 53 Nueva configuración las estaciones	106
Figura 54 Assign, TEstacion	107
Figura 55 Colas LVA (TEstación)	107
Figura 56 Modelo por lotes de transferencia unitaria ampliado	108
Figura 57 Modelo por lotes de transferencia unitaria	109
Figura 58 Separate, desagregación de lotes	109
Figura 59 Assigns y decide, numeración de piezas	110
Figura 60 Estación, modelo por lotes de transferencia unitaria	110
Figura 61 Comprobación de tipo de pieza	111
Figura 62 Inicialización de tipo y envío de señal	112
Figura 63 Colas LVA (Orden) para los Holds	113
Figura 64 Colas LVA (Timepo de proceso) para los Holds	114
Figura 65 Colas FIFO para los Holds	114

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1 Utilización de las máquinas %	121
Gráfico 2 Tiempo total de fabricación (minutos)	122
Gráfico 3 Tiempo en espera medio (minutos) Modelos por lotes	122
Gráfico 4 Tiempo de ciclo medio (minutos) Modelos por lotes	123
Gráfico 5 Tiempo en espera medio Modelos por piezas	123
Gráfico 6 Tiempo de ciclo medio Modelos por piezas	123

1. INTRODUCCIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN

A lo largo de nuestra historia el ser humano ha intentado a través de la manufactura modificar el entorno para cubrir sus necesidades, comenzando con la producción de artículos de piedra, cerámica y metal. Ya en la antigüedad la civilización romana poseían fábricas para la producción en masa de artículos de vidrio, y en muchas actividades, incluyendo la minería, la metalurgia, y la industria textil se ha empleado desde hace mucho tiempo el principio de división de trabajo. No obstante, durante siglos gran parte de la manufactura permaneció como una actividad esencialmente individual, practicada por maestros artesanos y sus aprendices. El ingenio de generaciones sucesivas de artesanos condujo al desarrollo de muchos procesos diferentes y a una gran variedad de productos, pero la escala de producción estaba necesariamente limitada por la potencia disponible. Así potencia del agua sustituyó a la muscular de la Edad Media, pero solo hasta el punto permitido por la disponibilidad del agua en movimiento; ello limitó la localización de las industrias y la tasa de crecimiento de la producción industrial. Con el dominio del vapor y posteriormente la electricidad se produjo un salto hacia una producción en masa y con una calidad cada vez mayor en los productos.

Siendo la producción una de las actividades económicas de la empresa que persigue la obtención de productos o servicios para ofrecer una respuesta a las necesidades de los clientes, es lógico estudiar cómo poder optimizar este aspecto dentro de la empresa.

El ámbito de la *Producción* u *Operaciones*, que tradicionalmente no ha formado parte de las estrategias básicas de la dirección de las empresas es, desde hace un cuarto de siglo, un área de gestión que ha sufrido cambios en profundidad. Éstos, han acabado por afectar a la gestión misma de toda la empresa y es cada vez más frecuente que los aspectos relacionados con las operaciones se hallen con un peso importante en los planes estratégicos empresariales.

La razón es bien simple: en los *procesos de producción* es en donde la empresa genera su mayor o menor *valor añadido*; sobre los recursos que utiliza en dichos procesos y este valor añadido es precisamente donde está la fuente del beneficio que obtendrá la empresa. Estos conceptos han adquirido recientemente un gran protagonismo, de manera que los nuevos sistemas de gestión de la producción desarrollados en la segunda mitad del siglo XX, ampliamente aplicados en las dos últimas décadas del mismo, se apoyan muy directamente en la gestión por *procesos* frente a la tradicional por *operaciones* aisladas. De este modo, la gestión se basa en optimizar el *valor añadido* de tales procesos. Estos

enfoques han demostrado que, con la adecuada estrategia, que involucre al sistema productivo, pueden alcanzarse niveles muy elevados de eficiencia y por tanto de competitividad.

Los sistemas de organización industrial desarrollados a principios del siglo XX y, muy especialmente, desde que Henry Ford implantó sus cadenas de montaje de automóviles en 1913, han perdurado con pocos cambios que no fueran aportaciones tecnológicas, hasta hace no demasiados años. El motor de los cambios que se han dado en la organización y gestión de los sistemas productivos ha sido la evolución de nuestra sociedad y, en especial, la de los mercados y el comportamiento de los consumidores, en el último cuarto de siglo. Estos cambios han supuesto la introducción paulatina de nuevos planteos en la organización de los sistemas productivos, su gestión y estrategia, de forma que se ha evolucionado desde un enfoque tradicional, basado en la *producción de grandes volúmenes de productos homogéneos* (cuya productividad se fundamenta esencialmente en las *economías de escala*), a un enfoque denominado de *producción ajustada, basada en la mínima utilización de recursos de todo tipo posible* (y cuya eficiencia se deriva por tanto de la eliminación de consumos innecesarios o *despilfarros*).

Los sistemas de organización y gestión de la producción basados en este enfoque, derivan de los trabajos de *Taiichi Ohno* y la empresa automovilística *Toyota*, y han dado lugar a esta nueva filosofía de la que se nutre la gestión eficiente actual, básicamente en la empresa industrial pero, cada vez más también, en la empresa de servicios. Esta aplicación de los principios y métodos del sistema de producción de Toyota (TPS), a otros ámbitos industriales y de servicios, ha dado lugar, a su vez, a lo que hoy conocemos como *Lean Management*. Por otra parte, la gestión actual de los sistemas productivos se está caracterizando, cada vez más, por una mayor flexibilidad en la gama de productos y los volúmenes de producción, adaptándose de forma progresivamente mayor a las exigencias variadas y cambiantes de los mercados. Esta filosofía, basada en la producción ajustada y flexible, ha demostrado un nivel de eficiencia realmente asombroso y, por tanto, no es extraño que en la actualidad se esté aplicando a todos los procesos de la empresa y no solo a la producción.

Este es el caso de la introducción de técnicas distintas y sobre todo más flexibles en la planificación y gestión comercial (ventas y nuevas estrategias de marketing), así como de la gestión económica y financiera y su control. En todas ellas, los procesos y sus actividades han adquirido un gran protagonismo en la gestión y sus estrategias, dando lugar a la nueva *gestión basada en las actividades (ABM)*. Además, en el ámbito de la gestión de los sistemas productivos, las distintas áreas de gestión han sufrido paralelamente, un fuerte impulso y una transformación en profundidad, apareciendo nuevas e importantes parcelas de gestión, que debido a este impulso han adquirido carta de identidad entre los que destacarán los sistemas *Just in Time*, la *Gestión de la Calidad Total*, área que huelga decir la importancia que ha adquirido en los últimos tiempos y a la *Logística Integral*, parcela que puede decirse que con el importante aumento de peso que ha tenido en el conjunto de la organización empresarial, ha

pasado de no existir como área de gestión (formando parte de otras distintas áreas, en especial ventas y producción), a tener un cuerpo disciplinario propio de gran peso específico (Cuatrecasas, 2000).

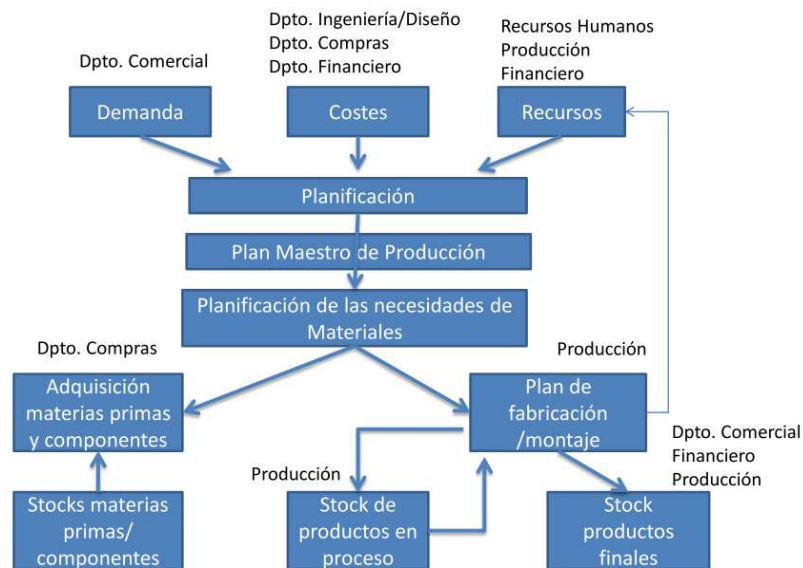


Figura 1 Organización de los departamentos con la producción (Canca, Sistemas productivos, 2014)

1.2 OBJETIVOS

El propósito de este trabajo es por una parte divulgar la utilidad de la simulación en la planificación táctica y operativa dentro de una empresa real, como un sistema fiable para la toma de decisiones con un impacto nulo durante la realización de las distintas simulaciones en el actividad de la empresa, siendo un experimentos no invasivo dentro de la empresa, a diferencia de otras políticas o mentalidades organizativas de cambio para la producción de la empresa. Por otra parte la intención del trabajo es, mediante una planificación estratégica sobre la carga en las estaciones realizada anteriormente en un trabajo de fin de máster (TFM-Romo, 2015), poder realizar a nivel operativo una organización eficiente aplicando técnicas de simulación y programación de la producción de eficacia demostrada, y así, conseguir un orden en el procesado de los trabajos de la empresa para una reducción en los tiempos totales de capa pedido.

Las simulaciones se han elaborado para una empresa de fabricación de componentes para la industria automotriz, Ferroviaria y Metalmeccánica, en concreto en el área que fabrica Electrodo. Así mismo, todo lo que se exponga en el Capítulo 5 será con el fin de ilustrar teoría referente al entorno de dicha empresa, organización y problemática.

Con las distintas simulaciones se pretenden estudiar cómo afectan el orden de los trabajos antes de entrar en las estaciones para su procesado, así se aplicarán distintos métodos conocidos como FIFO

(*First-In-First-Out*) y LAV (*Lowest Attribute Value*), métodos que consisten en ordenar los trabajos de menor a mayor según un atributo de la pieza como por ejemplo, que se procesen primero los trabajos con un número menor según la prioridad de fabricación de ese pedido, siendo en más prioritario en número uno y el menos prioritario en número más alto. También se estudiará las ventajas de procesar los lotes disgregándolos en piezas y cómo afecta el Set-Up a estos diferentes métodos.

1.3 ESTRUCTURA DEL TRABAJO

La estructura del trabajo se ha dividido de la siguiente manera:

Capítulo 2- La planificación estratégica de la producción. En este capítulo se abordará de manera concisa en qué consiste la planificación a largo plazo de una empresa, explicando aspectos como la selección y diseño de proceso o la planificación de la capacidad. También se hablará sobre la producción automatizada explicando los sistemas de fabricación flexible (FMS), sistema utilizado por la empresa que se estudia. Por último se resumirá el estudio de la solución del problema en entornos de SFF de carga de máquinas y selección de pedidos, tratado el trabajo de fin de máster cuyos resultados han sido utilizados en este trabajo para su realización.

Capítulo 3- Programación y control de la producción. En este capítulo se explicará en qué consiste la planificación a medio-corto plazo dentro de una empresa, la importancia de los tiempos y los métodos actuales para el cumplimiento de los pedidos como el JIT o el Lean Manufacturing, también se abordará el concepto de Job-Shop configuración de taller utilizado por la empresa en estudio y las actuales soluciones que se aplican en dichos entornos. Tratando las reglas de despacho y heurísticas.

Capítulo 4- Simulación. En este capítulo se expondrán conceptos básicos de simulación y se explicará la utilidad de dicha herramienta, con una esquematización sobre proyectos de simulación en la que se enumeraran las etapas de un proyecto de simulación. Posteriormente, se hablará sobre la simulación de sistemas dinámicos de eventos discretos, tipo de simulación utilizado para la realización del trabajo, por último se explicará el programa utilizado, ARENA Software®, y los módulos de los que se compone.

Capítulo 5- Descripción del problema. En este capítulo se realizará una introducción a la empresa sobre la cual se basa el estudio, se expondrá su historia, a qué se dedica, la productos que fabrica y la manera actual en la que realiza la programación y el control de la producción, también enunciaremos cuál es la problemática actual a la que se enfrenta la empresa y que ha originado el desarrollo de este trabajo.

Capítulo 6- Simulación del problema. En este capítulo se recogen los datos de partida en los que se han basado los modelos de simulación y se explicará cómo se ha modelado el problema. Explicando los dos grupos de modelos creados y sus variantes.

Capítulo 7- Resultados de la simulación. En este capítulo se verán los resultados obtenidos en los distintos escenarios simulados, cómo ha afectado al tiempo total de fabricación la distinta ordenación en el procesado de los pedidos y la división de los lotes en piezas.

Capítulo 8- Conclusiones. En este capítulo se reunirán las conclusiones extraídas de las simulaciones llevadas a cabo así como líneas futuras de trabajo.

Capítulo 9- Bibliografía.

2. LA PLANIFICACIÓN ESTRATÉGICA DE LA PRODUCCIÓN.

2.1 INTRODUCCIÓN

Si bien el cometido de este trabajo es valerse de una herramienta para la planificación a medio y corto plazo, a fin de conseguir una visión general de toda la planificación y organización no debemos olvidarnos de la planificación estratégica o también denominada a largo plazo, de tres a cinco años (Domínguez Machuca, 1995). Así pues, la estrategia de operaciones se puede definir como una visión de la función de operaciones que depende de la dirección o impulso generales para la toma de decisiones. Esta visión se debe integrar con la estrategia empresarial y con frecuencia, aunque no siempre, se refleja en un plan formal. La estrategia de operaciones debe dar como resultado un patrón consistente de toma de decisiones en las operaciones y una ventaja competitiva para la compañía.

2.2 EL CONCEPTO DE PLANIFICACIÓN DE LA PRODUCCIÓN

El concepto de la planificación aborda muy diferentes aspectos dentro de una empresa y más la planificación de la producción, ya que las tareas comprendidas abarcan desde la consecución de los requisitos de producción a la cadena productiva en fábrica del plan maestro de producción hasta la secuenciación de los trabajos entre estaciones y la alineación entre pedidos. Es por este motivo es lógico que la tarea de planificar la producción recaiga en un grupo de personas dentro de la organización con niveles jerárquicos diferentes.

Dada la complejidad de las tareas anteriormente expuestas es necesario dividir la planificación de la producción a fin de tratar de manera uniforme problemas similares, la forma más común de clasificación se basa en el horizonte temporal de las tareas a realizar, cabe destacar que dichos horizontes distan mucho de ser uniformes, dependiendo del tipo de industria e incluso entre las diferentes empresas del sector, así que se expondrá en propuesto por (Chase & Aquilano, 1994).

- I. Largo Plazo: El objetivo es declarar los propósitos e intenciones de la empresa para los siguientes 10 años. Como se comentó antes esta planificación también se le llama Planificación Estratégica, en la que se establecen aspectos como la localización y asignación de plantas, la capacidad de producción, el tipo de proceso seguido por la empresa con la distribución en planta, la infraestructura de la empresa o la cualificación del personal. Las decisiones

estratégicas que abordan esta planificación requieren grandes inversiones y su impacto en la organización es tan grande que no pueden ser alteradas en un corto espacio de tiempo debido a las pérdidas tan elevadas que supondría. Cuando una compañía afronta este tipo de decisiones siempre debe prever la incertidumbre vinculada del mercado en los próximos años.

- II. Medio Plazo: Esta planificación tiene un horizonte temporal de seis a dieciocho meses llamándose también Planificación Táctica, dentro de esta clasificación entran las decisiones relacionadas con aspectos como la previsión de la demanda, prediciendo la incertidumbre de los mercados, la gestión de inventarios, analizando el inmovilizado medio, la capacidad de operación o la calidad de servicio, por último planifica la producción asignando la tasa de producción o niveles de stock a través de la planificación agregada. Todas estas decisiones se agrupan bajo el Plan Maestro de Producción (MPS).
- III. Corto Plazo: Es esta planificación la franja temporal oscila entre desde un día a seis meses, a este tipo de clasificación también se la denomina como Planificación Operativa. En el corto plazo se decide la programación de la producción entendiéndose esta como una organización flexible y dinámica que permita llevar a fin el Plan de Producción (procurando satisfacer la cartera de pedidos y demanda prevista) siendo capaz de afrontar las situaciones adversas que se producen diariamente.

2.2.1 PLANIFICACIÓN DE LA CAPACIDAD

La capacidad se considera como la cantidad de producto o servicio que puede ser obtenido por una determinada unidad productiva durante un período de tiempo y bajo unas condiciones ideales.

Debido a que la capacidad estratégica, a largo plazo, se encuentra definida por la estructura fija de la empresa, las decisiones serán de tipo estructural y suelen implicar importantes inversiones. Al poseer carácter estratégico condiciona los límites de la competitividad de la empresa, así en su defecto, provoca pérdidas de clientes al insatisfacer la demanda con la consecuente reducción de la cuota de mercado, al captar la competencia nuestros clientes. En exceso también supone una desventaja, puede llevar a exceso de inventarios o mantener equipos y personal ociosos, asumiendo una gran inversión inmovilizada.

Para afrontar la planificación de la capacidad se deben aplicar diferentes campos de conocimiento (previsión y previsión tecnológica, mercados, tecnología, gestión de la producción, etc.). A pesar de estos conocimientos y la alta inversión de las compañías en este aspecto, es frecuente que se puedan

cometer errores en la planificación normalmente debido a la natural incertidumbre de la demanda futura (Companys & Corominas, 1993).

Las empresas intentan siempre encontrar economías de escala debido a que a medida que una planta crece y su volumen incrementa, el coste promedio por unidad de producto disminuye debido a que el coste de operación y el capital disminuyen, porque por lo general no cuesta el doble comprar u operar una pieza de equipo que tiene el doble de capacidad que otra. Las plantas también obtienen eficiencias cuando utilizan plenamente los recursos dedicados para tareas como el manejo de materiales, el equipo de cálculo y el personal administrativo de apoyo. A medida que el tamaño de la planta resulta demasiado grande aparecen las deseconomías de escala presentándose de diferentes maneras. Por ejemplo, a fin de mantener la demanda que se necesita para que una planta muy grande permanezca activa tal vez se requiera ofrecer descuentos sustantivos del producto. Los fabricantes estadounidenses de automóviles han representado algunos ejemplos de estas políticas.

2.2.2 ESTRATEGIAS DE FABRICACIÓN

La actitud que posee el cliente frente a los tiempos de entrega del producto o servicio conlleva a la elección entre distintas estrategias de fabricación que condicionan la forma de producir. Los factores más importantes para elegir entre las distintas estrategias son el volumen y la variedad de productos. A su vez estos factores dependen de la influencia que tiene el cliente sobre el diseño del producto siendo en algunos casos parte fundamental de la estrategia comercial de la empresa, en otros casos dicho diseño depende de las directrices del mercado (Chapman, 2006).

- I. Ingeniería bajo pedido (ETO, Engineer to order): El diseño del producto o servicio y su posterior fabricación empiezan con la orden de pedido del cliente. Normalmente el cliente no se verá afectado por la utilización de componentes o materia prima estándar, pudiendo exigir al fabricante un producto fabricado “desde cero”, por lo tanto no existen dos productos iguales. La fabricación conlleva generalmente tiempos bastante dilatados desde que se produce el pedido hasta la entrega del producto.
- II. Ensamblado bajo pedido (ATO, Assembly to order): En este tipo la influencia del cliente en el producto depende de un grupo de determinados subcomponentes predefinidos entre los que el cliente elige. El fabricante “ensamblará” los subcomponentes elegidos por el cliente para formar el producto final. El cliente suele esperar unos tiempos de entrega reducidos obligando al fabricante a tener inventarios de subcomponentes y de productos intermedios y realizar estimaciones bastante precisas sobre la demanda.

- III. Fabricación bajo pedido (MTO, Make to order): En este caso la fabricación no comienza hasta que no se ha recibido el pedido del cliente. En este tipo fabricación es el cliente quien elige el diseño del producto, siempre y cuando en su fabricación se utilicen materias primas y componentes estándar, siendo el diseño y el desarrollo del producto definido por el fabricante limitando al cliente a escoger un producto de la gama. Esta estrategia de fabricación es la escogida por la empresa bajo estudio.
- IV. Fabricación contra stock (MTS, Make to stock): Es estrategia el cliente espera llevarse el producto terminado en primer contacto con el fabricante (distribuidor). Los productos terminados son almacenados, lo que obliga a mantener inventarios de estos productos. La base de clientes sólo puede tener influencia sobre el producto en una fase muy temprana en el diseño del producto, sin embargo el cliente final sólo puede tomar dos decisiones con respecto el producto: adquirirlo o no, lo que obliga a afinar en la previsión de la demanda.

2.3 LA PRODUCCIÓN DE LA EMPRESA

La producción de la empresa se realiza a través de la realización de un grupo de operaciones integradas en los procesos. Por este motivo dirección de la producción a menudo se denomina dirección de operaciones siendo una serie de actividades que crean valor en forma de bienes y servicios al transformar los recursos en productos. En todas las organizaciones hay actividades de producción de bienes y servicios. Por ejemplo en las empresas industriales, las actividades de producción de bienes son bastante obvias. En ellas se ve la producción de un bien tangible.

En las empresas que no producen bienes físicos, la función de producción puede resultar menos obvia. Puede estar “oculta” al público, e incluso al consumidor. Por ejemplo, la transformación que tiene lugar en un banco, en un hospital, en la oficina de una compañía aérea o en la universidad. A menudo, cuando se presta un servicio no se produce ningún bien tangible. Por el contrario, el producto puede tomar formas tan variadas como una transferencia de fondos de una cuenta de ahorro a una cuenta corriente, la ocupación de un asiento vacío en un avión de una compañía aérea o la educación de un estudiante. Con independencia de que el producto final sea un bien o un servicio, las actividades de producción que tienen lugar en una organización se denominan habitualmente operaciones o dirección de operaciones. Así la dirección de operaciones nos ayuda a averiguar cómo se organizan las personas para emprender un proyecto productivo, cómo se producen los bienes y servicios y por qué es una de las actividades que generan más costes en cualquier organización (Heizer & Render, 2007).

2.4 SELECCIÓN Y DISEÑO DE PROCESO.

La selección y diseño de proceso depende a su vez de la planificación y diseño de los productos, así dicha planificación productiva puede presentar distintas configuraciones clasificadas con distintos patrones según el autor. Según la diferencia de productos obtenidos se puede clasificar en tres tipos (Domínguez Machuca, 1995):

- Continua, los productos obtenidos son siempre los mismos y se fabrican en una misma instalación.
- En proyectos, cuando se obtiene uno o pocos productos tras un amplio período de fabricación.
- En lotes, existen distintos tipos de productos elaborados en una misma instalación.

También se podría seguir la clasificación ideada por (Hayes & Wheelwright, 1984), resumida en la siguiente tabla.

	Proyecto	Taller	Lotes	Línea	Continuo
Flujo	No existe	Desordenado	Desconectado	Conectado	Continuo
Flexibilidad	Muy alta	Alta	Media	Baja	Muy baja
Nº productos	Único	Muchos	Varios	Pocos	Único
Inversión	Muy baja	Baja	Media	Alta	Muy alta
Costes variables	Muy altos	Altos	Medios	Bajos	Muy bajos
Mano de obra (Cantidad)	Muy alta	Alta	Media	Baja	Muy baja
Mano de obra (Cualificación)	Muy alta	Alta	Media	Baja	Muy baja
Volumen	1	Bajo	Medio	Alto	Muy alto

Tabla 1 Selección del tipo de proceso

En lotes, es el tipo de proceso de producción elegido por la empresa bajo estudio.

2.5 PRODUCCIÓN AUTOMATIZADA: SISTEMAS DE FABRICACIÓN FLEXIBLE (FMS).

Dado que la cantidad de variantes de piezas que producen en la empresa es media y la demanda es también media en dicha empresa es tipo de proceso de producción que tiene es un sistema de fabricación flexible.

La fabricación flexible consiste en una computadora central que suministra instrucciones a cada estación de trabajo y para el equipo de manejo de material (que traslada el material a cada estación de trabajo), el sistema se denomina célula de trabajo automatizada, o sistema de fabricación flexible (FMS, Flexible Manufacturing System). Un FMS es flexible porque tanto los dispositivos de manejo del material como las propias máquinas se controlan mediante señales electrónicas (programas de computadora) fácilmente modificables. El operador del sistema, cuando sea necesario simplemente carga nuevos programas para producir diferentes productos.

El resultado es un sistema que puede producir económicamente bajos volúmenes pero alta variedad. Los sistemas FMS salvan el vacío que hay entre las instalaciones enfocadas a producto y las instalaciones enfocadas a proceso. Sin embargo, los FMS también poseen algunos inconvenientes, ya que los componentes individuales (máquinas y dispositivos de manejo de materiales) tienen sus propias limitaciones físicas. Un FMS tiene también unos requisitos estrictos de comunicación entre componentes especiales que se encuentran en él.

Sin embargo, el tiempo de reducción en los cambios/preparaciones de equipos y una programación del trabajo más precisa permiten una producción más rápida y una mejor utilización. Debido a que hay menos errores, se consigue reducir las pérdidas por desperdicios, lo que también contribuye a reducir los costes. Estas características son las que están buscando los directores de operaciones: flexibilidad para proporcionar productos a medida (personalizados), mejor utilización para reducir costes, y mejora del rendimiento para mejorar la respuesta (Heizer & Render, 2007).

2.6 CARGA DE MÁQUINAS Y SELECCIÓN DE PEDIDOS.

Como se he explicado anteriormente el objetivo de este trabajo es planificar la producción a corto plazo, basándose en una planificación a largo plazo ya estudiada en un trabajo final de máster, por consiguiente antes de ahondar en el problema de la planificación operativa debemos explicar cómo se

han resuelto los problemas que la planificación a largo plazo plantea, entre esos problemas se verá el problema de carga de máquinas y selección de productos y cómo se enfocó en dicho trabajo.

El problema de carga de máquinas (Machine Loading Problem) se ha descrito de forma diferente según el autor, una de esas definiciones podría ser: “[...] *dada una serie de partes a ser fabricadas, una serie de herramientas necesarias para procesar las partes en una serie de máquinas y utilizando un conjunto de recursos tales como sistemas de manejo de material, pallets y accesorio; cómo deben asignarse dichas partes y colocarse las herramientas, de modo que la productividad sea optimizada*” (Stecke K., 1983).

El principal problema al que se enfrenta la optimización de la carga de máquinas es la mezcla de rutas en las estaciones, ya que puede haber trabajos que puedan ser procesados en diferentes rutas con diferentes estaciones, incluso el pedido de un determinado tipo de pieza puede ser dividido para que se procesen en las diferentes rutas. Otro aspecto a tener en cuenta es la vida útil de las herramientas y cómo afecta este límite de tiempo al procesamiento de los trabajos o cómo influye la capacidad de almacén de estas herramientas en el equilibrio del sistema. El problema cuenta con unas restricciones tecnológicas basadas en los datos de fabricación de los productos, las rutas que pueden seguir, las máquinas y las herramientas utilizadas para cada producto.

Normalmente se utilizan dos enfoques para la carga de los centros de trabajo: carga infinita y carga finita. Con carga infinita los trabajos son asignados a los centros de trabajo sin tener en cuenta la capacidad del centro de trabajo. Bajo este enfoque se suelen utilizar reglas de prioridad. Así los trabajos se cargan en los centros de trabajo de acuerdo con la regla de prioridad elegida. Esto se conoce como carga vertical.

Si nos encontramos con el enfoque de carga finita, esta considera la capacidad de cada centro de trabajo y compara el tiempo de procesamiento de modo que el tiempo de proceso no exceda la capacidad. Con la carga finita el programador carga el trabajo que tiene la más alta prioridad en todos los centros de trabajo por los que va a pasar. A continuación, el trabajo con la siguiente prioridad más alta se carga en todos los centros de trabajo por los que va a pasar, y así sucesivamente. Este procedimiento se refiere como carga horizontal. Así se puede proyectar el número de horas que cada centro de trabajo va a operar. Un inconveniente de la carga horizontal es que los trabajos se pueden mantener en espera en un centro de trabajo, aunque el centro de trabajo esté inactivo. Esto sucede cuando se espera que un trabajo de mayor prioridad llegue en breve. El centro de trabajo se mantiene inactivo por lo que estará listo para procesar el trabajo de mayor prioridad tan pronto como llegue.

Así, con la carga vertical se garantiza que el centro de trabajo esté siempre cargado. Por supuesto, esto significaría que un trabajo de mayor prioridad tendría que esperar para ser procesado. Se tendría entonces que sopesar los costes de mantener los trabajos de mayor prioridad esperando, el coste de los

centros de trabajo inactivos, el número de puestos de trabajo y centros de trabajo, la posibilidad de interrupciones, nuevos trabajos y cancelaciones.

Si la empresa tiene una capacidad limitada (por ejemplo, dos turnos de trabajo diarios), la carga finita sería conveniente ya que supone un límite superior de la capacidad. Si se utiliza la carga infinita, la capacidad puede tener que aumentarse a través de las horas extraordinarias, la subcontratación, o expansión, o el trabajo puede tener que ser desplazado a otros turnos o máquinas.

2.6.1 SOLUCIÓN DEL PROBLEMA EN ENTORNOS DE SFF.

En los sistemas de fabricación flexibles el problema de carga de máquinas pasa por centrarse en solucionar el desequilibrio en el sistema y el rendimiento de este, explorando las distintas combinaciones de asignación buscando a su vez minimizar el desequilibrio y maximizar el rendimiento.

Existen autores que han se han centrado en resolver la carga de máquinas y la selección de productos de forma separada, ya sea a través de un enfoque matemático, heurístico o basado en inteligencia artificial. A continuación se recogen algunos autores y métodos aplicados.

Solución al problema de carga de máquinas	
Autores	Método de resolución
Kumar, Singh, Tiwari, & Shankar, 1987	Multi-criterio Min-Max
Shanker & Srinivasulu, 1989	Branch and Backtrack
Kuhn, 1995	Programa linear mixto 0-1
Mahapatra & Biswas, 2007	Particle Swarm Optimization
Ponnambalam & Kiat, 2008	Particle Swarm Optimization con búsqueda local

Tabla 2 Autores y métodos de resolución al problema de carga de máquinas.

Con respecto al problema de selección de productos (Denizel & Sayin, 1998) atacan el problema como un problema de programación matemática bi-criterio, primero maximizar la salida del sistema a través de procesar el mayor número de trabajos posibles para que se procesen, y en segundo lugar minimizando la tardanza total al entregar los productos.

2.6.1.1 SOLUCIÓN CONJUNTA AL PROBLEMA DE CARGA DE MÁQUINAS Y SELECCIÓN DE PRODUCTOS.

También existen autores que han resuelto los problemas de carga de máquinas y selección de productos de manera conjunta. En la siguiente tabla se recogen algunos de esos autores y el método de resolución utilizado.

Autores	Método de resolución
R. Swarnkar y M.K. Tiwari, 2004	Búsqueda Tabú híbrida y recocido simulado
S. Bilgin & M. Azizoglu, 2006	Relajación Lagrangiana
F.T.S. Chan & R. Swarnkar, 2006	Optimización de colonia de hormigas
Prakrash, N. Khilwani, M.K. Tiwari & Y. Cohen, 2008	Algoritmo Inmune
M.K. Tiwari, S. Kumar & R. Bardhan, 2010	Sistema multi-agente
K. Seok, J.O. Park & Y. Keun, 2011	Algoritmo evolutivo simbiótico
H.-W. Kim, J.-M. Yu, J.-S. Kim, H.-H Doh, D.-Lee & S.-H. Nam, 2012	Heurísticas de dos niveles basadas en algoritmos de “bin-packing” y técnica de búsqueda simple
Mahmudy, Lee H. & Romeo, 2013	Algoritmos Genéticos (AG)

Tabla 3 Autores y métodos aplicados al problema selección de pedidos y carga de máquinas.

3. PROGRAMACIÓN Y CONTROL DE LA PRODUCCIÓN.

Tras ver en el capítulo anterior cómo se definía la planificación de la producción dentro de una empresa y explicar en qué consistía la planificación estratégica o a largo plazo, en este capítulo se explicará la planificación a medio-corto plazo dentro de una empresa, planificación tratada en este trabajo dentro de la empresa de estudio.

En los sistemas industriales y de servicios la programación de la producción juega un papel crucial ya que consiste en la toma de decisiones en la fabricación. En el mercado actual, rápidamente variable, poseer una programación de la producción eficaz supone una garantía de supervivencia, puesto que la empresa deber cumplir unas fechas de entregas determinadas con los clientes ajustando así los plazos de producción, el incumplimiento de estas fechas puede suponer en una pérdida de confianza en el cliente y la consecuente pérdida económica.

Habitualmente, la programación de la producción define a la asignación de recursos, generalmente limitados, a unos procesos, durante un tiempo especificado con los métodos más adecuados. Así el objetivo final es optimizar la máxima productividad y calidad minimizando a su vez el tiempo y el coste empleado.

El proceso de planificación y control de la producción se puede reflejar en tres etapas (Eguía Salinas, 1996):

- I. *Planificación*, se determina el plan maestro de producción, que consiste en el cálculo de las cantidades y fechas en las que deben estar disponibles los inventarios de distribución.
- II. *Cálculo* del programa detallado de fabricación y aprovisionamiento, y de las cargas de trabajo en las secciones, a partir del plan maestro.
- III. *Control* y seguimiento de las operaciones de taller y de los proveedores para cumplir el programa detallado.

3.1 PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE UN SISTEMA DE PRODUCCIÓN.

Según (Powell, 1970) antes de poder desarrollar un plan de producción debemos conocer detalladamente los requisitos de producción. En consecuencia debemos tener en cuenta cuatro características fundamentales:

- I. La primera característica es una escala de la capacidad que posee la planta. Esta medida se descompone en grupos de máquinas, personas o departamentos.
- II. La segunda hace referencia a la medición de la capacidad sobre los trabajos y productos fabricados, así una planta que fabrica un solo producto es fácilmente medible, sin embargo en aquellas plantas en las que se producen trabajos y productos diferentes es más complejo dicha medición, teniéndose que dividir la producción total según la cantidad de los diferentes productos y el tipo de producto.
- III. La tercera característica es la existencia de un sistema para repartir la producción que se programe entre la capacidad disponible. Se pueden utilizar diferentes técnicas o reglas: FIFO, es primero que entra es el primero en salir, LIFO, el último que llega es el primero en salir o reglas basadas en algún tipo de prioridad como fabricar primero los trabajos que posean menor tiempo de procesado, etc. Este sistema para organizar los trabajos entre la capacidad deberá proveer períodos de tiempo a corto plazo desde días hasta un mes, durante este período de tiempo se deberá seguir el plan de producción para garantizar la optimización del tiempo y recursos.
- IV. La cuarta característica es el ciclo de reprogramación, a consecuencia de que en muchas ocasiones las órdenes se retrasan, lo que afecta al plan de producción y por consiguiente al cálculo de tiempos y secuenciación, de este modo debe existir la posibilidad de reprogramar la producción de forma ágil para garantizar el menor contratiempo posible al sistema.

3.2 CUMPLIMIENTO DE LAS ENTREGAS.

El objetivo primordial de la programación y control de la producción es sin duda el cumplimiento de las entregas, todo el sistema está enfocado a tal efecto. De esta manera, sería insustancial tener una configuración productiva óptima, una calidad en el producto inigualable o el mejor diseño de planta cuando no se consigue cumplir con la fecha de entrega del producto al cliente. Esta idea se acrecienta cuando la empresa forma parte de una cadena productiva entre empresas en cuya situación no sólo afecta el retraso a la empresa, sino también, al resto de eslabones de la cadena.

Este objetivo ha sido tratado por los autores (Dominguez Machuca, Álvarez, Domínguez, García, & Ruiz, 1998) que identifican dos factores clave para conseguir una competencia basada en el tiempo: “*entregas en fecha*” y “*entregas rápidas*”, por consecuencia los dos objetivos serían:

- ✓ Entregar en fecha acordada con el cliente todos los pedidos o en su defecto el mayor número de ellos.
- ✓ Entregar lo más rápidamente posible desde que se recibe en encargo hasta que se la entrega al cliente.

Se debería intentar por tanto igualar el tiempo de entrega planificado con el real e intentar siempre que se pueda adelantarse al mismo. Una vez que se consiguen entregar los pedidos a tiempo existen otros factores a cumplir que podrían poner en peligro la relación con el cliente según (Garvin D., 1994) estos serían:

- ✓ Calidad correcta del producto al llegar a su destino.
- ✓ Exactitud, o coincidencia entre la cantidad entregada y la solicitada por el cliente.
- ✓ Accesibilidad de la información sobre el pedido, que deberá estar disponible en tiempo real.
- ✓ Flexibilidad de los pedidos, intentando mejorar la libertad del cliente para elegirlos.
- ✓ Facilidad de pedido, de forma que el cliente tenga la mayor comodidad posible para su realización.
- ✓ Facilidad de devolución, o voluntad de la empresa para asumir el coste de devolución del producto.

3.2.1 LEAN MANUFACTURING.

En la actualidad el Lean manufacturing o producción ajustada es uno de los modelos de gestión más extendidos y reconocidos en la industria, en consecuencia, se le debe dedicar una subsección en este capítulo, puesto que muchas de las ideas y conceptos que trata son de vital importancia para la programación y control de la producción y el cumplimiento de las entregas.

“El Lean Manufacturing es una filosofía de trabajo, basada en las personas, que define la forma de mejora y optimización de un sistema de producción focalizándose en identificar y eliminar todo tipo de desperdicios, definidos éstos como aquellos procesos o actividades que usan más recursos de los estrictamente necesarios” (Hernández y Vizán, 2013).

De esta forma aquellas empresas que implementan la metodología Lean buscan una serie de objetivos claros: entregar el producto adecuado, mínimo empleo de recursos, realizar procesos correctos, una gestión adecuada, conseguir la máxima calidad, y minimizar costes (fijo, amortizaciones, variables), tiempo y volumen de stock.

Los despilfarros a los que hace referencia la metodología se dividen en 5 grupos:

- I. Sobreproducción.
- II. Exceso de Almacenamiento, Existencias.
- III. Transportes y Movimientos Innecesarios del personal.
- IV. Tiempo de Espera.
- V. Defectos de calidad y Sobreprocesamiento.

Para solucionar estos despilfarros es necesario:

- I. Sobreproducción: Es el resultado de producir más cantidad de la que se requiere o de invertir o de diseñar equipos con mayor capacidad de la necesaria. (Utilizándolas al 100% de su capacidad). El tamaño de lote debe ser el demandado, producir en exceso implica perder el tiempo en producir algo que no se necesita, lo que implica un consumo inútil de material y que provoca un incremento en transportes y almacenes.
- II. Exceso de existencias: Oculta la presencia de casi todos los demás tipos de desperdicio; esconde problemas crónicos e ineficiencias. Encubre productos muertos, detectados en la realización de inventario; productos y materiales defectuosos, rotos, etc. Pero que no se han dado de baja. Supone un coste adicional (Almacenaje, cuidados, deterioro, mantenimiento, gestión, etc.). Desvirtúan las partidas de los activos de los balances: la 'inversión en stock', no ofrece retribución sobre las inversiones, y por tanto no pueden ser consideradas como tales. También genera costes difíciles de contabilizar (la obsolescencia de materiales, tiempo empleado en la detección de errores, incremento del lead time con la posible insatisfacción de los clientes).
- III. Transporte y manipulación innecesarios: El desperdicio por transporte, es el resultado de un movimiento o manipulación del material innecesario. Los errores de distribución en planta conducen a: Distancias excesivas para el recorrido de materiales, herramientas, productos (Habrá que optimizar la disposición de las máquinas y los trayectos). Y a manipulaciones adicionales, que pueden causar que los artículos se dañen.
- IV. Tiempo de Espera: Es el tiempo perdido como consecuencia de un proceso ineficiente. Son fáciles de detectar pero difíciles de evitar. Implica la sincronización entre actividades, para evitar que haya unos operarios parados mientras otros están saturados. En sistemas tradicionales, las esperas se evitan mediante búferes delante y detrás de las estaciones de trabajo.

- V. Defectos de calidad y Sobreprocesamiento: En cuanto a los defectos de calidad, es un despilfarro derivado de los errores, uno de los más aceptados en la industria. Los productos con defectos de calidad implican: Gran pérdida de productividad; incluyen un trabajo extra, costes adicionales, desajustes en la programación y se corre el peligro de que el producto defectuoso llegue al cliente. Para evitar defectos de calidad se debe diseñar el proceso de forma que no se produzca el fallo por medio de un control de la calidad en tiempo real. En cuando al sobreprocesamiento se deben desarrollar las actividades con el mínimo de recursos y en el menor tiempo posible esto implica el análisis de métodos y tiempos. También hay que evitar desaprovechar las economías de escala, a través del normalizando productos y componentes, herramientas o por métodos de trabajo aprovechando la ejecución repetitiva de los procesos y las posibilidades de automatización de los procesos.

Antes de ahondar en la gestión del tiempo de Lean debemos definir los tipos de tiempos más importantes:

- TAKT TIME (TT): espacio de tiempo entre dos peticiones consecutivas del cliente.
- CYCLE TIME (CT): tiempo que necesita la línea para entregar una nueva unidad.
- LEAD TIME (LT): tiempo total transcurrido desde que el elemento entra en línea hasta que se termina.
- PROCESS TIME (PT): tiempo que el elemento está siendo procesado.

El Tiempo de ciclo tiene que ser menor o igual al takt time, para poder cumplir con la demanda del cliente y en un momento determinado absorber las ineficiencias de la línea. También será necesario ajustar el ritmo de producción a la demanda del cliente, para poder entregar lo requerido sin sobreproducir. Tener la habilidad de cambiar el ritmo de producción es una ventaja competitiva, ya que permite eliminar desperdicios (a mayor velocidad de adaptación, mayor ventaja competitiva). Si además conseguimos que todas nuestras estaciones vayan a ritmo de takt, evitaremos tener inventarios intermedios, y por lo tanto un menor lead time. El concepto de FLUJO es la capacidad de un proceso de hacer que elementos o actividades que pasan por él, lo hagan en el menor lead time posible.

Las ventajas de tener un bajo lead time:

- ✓ Disminución de la obra en curso (dinero inmovilizado).
- ✓ Capacidad de reacción ante cambios de tipo de producto por parte del cliente.
- ✓ Disminución del tiempo de un elemento el proceso y por tanto del riesgo de que sufra algún contratiempo.
- ✓ Disminución del espacio requerido.

Si la mejora es tan obvia, ¿Por qué producir por lotes? Las ventajas de la producción por lotes consisten en una disminución del tiempo de preparación de la maquina o herramienta (Set Up), cuanto mayor sea

la serie, menor será el tiempo de preparación y el coste unitario. Por tanto, para aprovechar las ventajas del Flujo continuo y los beneficios de la producción por lotes, será necesario ajustar la línea de forma que el tiempo de cambio de configuración para hacer un determinado producto sea el menor posible. Para conseguirlo se usan herramientas como: Células flexibles o técnicas de cambio rápido de herramientas (SMED).

Uno de los factores más distintivos de Lean es el concepto de Pull, en otras palabras, sólo se produce lo que pide el cliente y cuando lo pide el cliente, por el cliente se entiende tanto al cliente final como al siguiente proceso de la línea. Las ventajas asociadas a este concepto son que se reducen los niveles de inventarios, se mejora la comunicación entre procesos y por último el sistema es capaz de responder de manera eficaz ante cambios en la demanda del cliente. Cabe mencionar que el concepto Pull es el utilizado por la empresa de estudio, fabricando sólo los pedidos de los clientes, sin necesidad de realizar estudios sobre la previsión de la demanda.

3.2.2 JUST IN TIME (JIT).

El método justo a tiempo, JIT o método Toyota es uno de los sistemas de organización de la producción que más ha crecido en las últimas décadas suponiendo un profundo cambio en la filosofía de producción tradicional. Consiste en hacer *“solo lo necesario, cuando se necesita y en la cantidad que se necesita”* (Toyota, 2016).

Así en una fabricación de componentes se podría, teóricamente, llegar al método justo a tiempo siendo los componentes recogidos por un trabajador y utilizados nada más llegar del proveedor. Y así eliminar cualquier inventario, del mismo modo, los productos podrían ser producidos justo a tiempo para entregarlos al cliente. De esta forma, si se aplicara de forma teórica el método JIT no se tendría ninguna necesidad de inventarios o stock, ya sean de materias primas en curso o de productos terminados.

Obviamente, conseguir una implantación perfecta del método JIT podría ser difícil, imposible, o extremadamente caro, en la vida real. Sin embargo, podríamos modificar un sistema ya existente hacia un sistema con elementos de JIT. Por ejemplo, considerando un proceso de fabricación que aun conservando los inventarios de productos finales podría organizar las entregas de materia prima por lo que, por ejemplo, los materiales necesarios para la producción de un día llegaran al inicio de la jornada y se consumieran durante el día, consiguiendo así la reducción efectiva o incluso la eliminación de inventario de materia prima.

Otro de los aspectos fundamentales del JIT es la adopción de sistemas de fabricación flexibles y una organización celular dirigidas a mejorar los flujos operacionales. La manufactura celular se basa en una

celda o estación dentro de una fábrica, esta se convierte en una pequeña fábrica dentro de una gran fábrica, pasando a ser autosuficiente en la que todas las operaciones para hacer una familia de piezas, componentes o productos completos se llevan a cabo. Esta mini fábrica, por así decirlo, con un equipo celular, gestiona la unidad con su propio funcionamiento y actúa como un servidor a otras células u operaciones. Dentro de la célula se agrupan diferentes máquinas necesarias para las diversas operaciones necesarias para completar un producto.

Mediante el uso de conceptos JIT, se pueden conseguir reducir la necesidad de materias primas y el trabajo en proceso, a su vez, los inventarios de productos terminados podrían ser inexistentes. El uso de un sistema de inventarios JIT tiene las siguientes ventajas:

- ✓ Garantiza la mínima cantidad de materiales obsoletos, ya que la alta tasa de rotación de inventario no mantiene ningún artículo en stock y evitando que se vuelva obsoleta.
- ✓ Los ciclos de producción son muy cortos, puesto que es muy fácil detener la producción de un tipo de producto y cambiar a un producto diferente para satisfacer los cambios en la demanda de los clientes.
- ✓ Los inexistentes niveles de inventario implican unos costes de mantenimiento de inventarios (y espacio de almacén) mínimos. La compañía invierte mucho menos en su inventario, ya que se no necesita tanto.
- ✓ En caso de accidentes, el inventario dañado dentro de los almacenes sería mínimo afectando menos a los planes de producción. Además tener menos inventario supone menor riesgo de sufrir accidentes asociados a la manipulación y transporte del mismo.
- ✓ Los errores de producción asociados a materias primas e inventarios se podrían detectar con mayor rapidez, lo que se traduce en un menor número de productos defectuosos producidos.

A pesar de la magnitud de las ventajas anteriores, también hay algunas desventajas asociadas con el método de inventario JIT:

- ✗ Un proveedor que no entregue los bienes a la empresa correctamente a tiempo y en las cantidades correctas podría afectar seriamente el proceso de producción.
- ✗ Un contratiempo que pudiera interferir con el flujo de materia prima hacia la empresa por parte de los proveedores, podría detener la producción de ambas empresas casi al mismo tiempo.
- ✗ Se debe hacer una inversión en tecnologías de la información para enlazar los sistemas informáticos de la empresa y con la de sus proveedores, de modo que puedan coordinar la entrega de piezas y materiales.
- ✗ La empresa podría no ser capaz de cumplir las exigencias de un pedido masivo e inesperado, al poseer pocas o ninguna existencia de productos terminados.

Al igual que la metodología Lean el JIT utiliza el concepto de órdenes Pull.

3.3 PROGRAMACIÓN, SECUENCIACIÓN Y REGLAS HEURÍSTICAS.

La programación de operaciones se refiere al establecimiento de la sincronización y el uso de los recursos dentro de una organización. En función de operaciones (tanto en la manufactura como en servicios), la programación se refiere al uso de equipos e instalaciones, la programación de las actividades humanas y la recepción de materiales.

Si bien las cuestiones relativas a la ubicación de la instalación y de la planta y la adquisición de equipos se consideran a largo plazo y la planificación agregada se considera mediano plazo, la programación de las operaciones se considera que es un problema a corto plazo. Como tal, en la jerarquía de toma de decisiones, la programación es por lo general el paso final en el proceso de transformación antes de la salida real se produzca (por ejemplo, de los productos terminados). En consecuencia, las decisiones de planificación se realizan dentro de los límites establecidos por estas decisiones a largo plazo.

Según (Finch, 2006) la programación efectiva ha aumentado recientemente en importancia. Este aumento se debe en parte a la popularidad de los métodos Lean Manufacturing y JIT. El consiguiente descenso de los niveles de inventario y el posterior aumento de la frecuencia de reposición se ha incrementado en gran medida la probabilidad de falta de existencias. Además, Internet ha aumentado la presión para programar con eficacia. Las relaciones "Business to customer " (B2C) y " business to business" (B2B) han reducido drásticamente el tiempo necesario para comparar precios, verificar la disponibilidad de productos, hacer la compra, etc. Tales transacciones instantáneas han aumentado las expectativas de los clientes, por lo tanto, hacer efectiva la programación es clave para la satisfacción del cliente. Hay que destacar que existen más de 100 paquetes de programación de software que pueden realizar evaluación de horarios, la generación de programación y programación automatizada. Sin embargo, sus resultados a menudo pueden mejorarse mediante el juicio y la experiencia de un programador humano.

Hay dos enfoques generales para la programación: la programación progresiva y la programación regresiva. Siempre y cuando los conceptos se aplican correctamente, la elección de los métodos no es significativa. De hecho, si los tiempos lead time (mover, colas y tiempos de preparación) se suman al plazo de ejecución del trabajo y el tiempo de proceso se suma después, entonces, la programación progresiva y la programación regresiva dan el mismo resultado. Con la programación progresiva, el programador selecciona un orden en la fecha de lanzamiento planificado y programa todas las actividades, desde este punto hacia adelante en el tiempo.

Con la programación regresiva, el programador comienza con una fecha de recepción planificada o la fecha de vencimiento y se mueve hacia atrás en el tiempo, de acuerdo con los tiempos de procesamiento requeridos, hasta que el programador dé la orden para comenzar.

Por supuesto hay otras variables a considerar aparte de las fechas de vencimiento o fechas de envío. Otros factores que inciden directamente en el proceso de programación pueden ser: los tipos de trabajos para ser procesados y los diferentes recursos con los que se pueden procesar cada uno, rutas de proceso, los tiempos de procesamiento, los tiempos de preparación, los tiempos de cambio, disponibilidad de recursos, número de turnos, el tiempo de inactividad o de mantenimiento planificado.

Como ya se mencionó en el capítulo anterior, uno de los problemas a los que se enfrenta la programación de la producción es la carga de las máquinas, esto implica la asignación de trabajos a centros de trabajo y de varias máquinas en los centros de trabajo. Si un trabajo se puede procesar en una sola máquina, no se presenta ninguna dificultad. Sin embargo, si un trabajo se puede procesar en varios centros de trabajo o máquinas, y hay varios puestos de trabajo libres, el proceso de asignación se complica. Se necesita alguna forma de asignar el trabajo a los centros de tal manera que el procesamiento y configuraciones se reduzcan al mínimo, junto con el tiempo de inactividad y el tiempo de procesamiento.

Para solventar este problema nace la secuenciación ocupándose de determinar el orden en que se procesan los trabajos. No sólo debe ser determinado el orden de los pedidos en la fábrica, sino también para los trabajos en cada una de las estaciones. Cuando las estaciones están fuertemente cargadas y hay trabajos con un tiempo de procesamiento grande, la situación puede llegar a ser compleja. El orden de procesamiento puede ser crucial cuando se incurren en costes espera y costes de inactividad en las estaciones.

Hay una serie de reglas de prioridad o heurísticas que pueden ser utilizadas para seleccionar el orden de los trabajos en espera para su procesamiento, a diferencia de los métodos exactos los métodos heurísticos proporcionan una solución razonablemente buena en un tiempo aceptable. Los más conocidos se presentan en una lista adaptada de (Vollmann, Berry, Whybark, & Jacobs, 2005):

- Aleatorio (Random, R). Se Escoge cualquier trabajo de la cola con la misma probabilidad. Esta regla se utiliza a menudo como un punto de referencia para otras reglas.
- Primero en llegar / primero en salir (First In First Out, FIFO). Esta regla a veces se considera razonable, ya que las tareas se procesan en el orden en que llegan.
- Último en llegar / primero en salir (Last In Last Out, LIFO). Esta regla apenas se utiliza como una solución básica de la que partir hacia mejores resultados. Suele ser útil cuando el material ocupa grandes superficies y la rotación es elevada.

- Tiempo de procesamiento más corto (Shortest Processing Time, SPT). El trabajo con el mínimo tiempo de procesamiento va primero. Esta regla tiende a reducir el inventario de trabajo en proceso, el tiempo promedio de rendimiento, y el retraso promedio de trabajo.
- Fecha de vencimiento más temprana (Earliest Due Date, EDD). El trabajo con la fecha de vencimiento más temprana va primero. Esto funciona adecuadamente si el rendimiento de la empresa se juzga por el retraso del trabajo.
- Índice crítico (Critical Ratio, CR). Para utilizar esta regla se debe calcular un índice de prioridad mediante la fórmula $[(\text{fecha de vencimiento-ahora}) / (\text{tiempo de espera restante})]$. Esta regla es ampliamente utilizada en la práctica.
- Trabajo restante mínimo (Least Work Remaining, LWR). Una extensión del SPT, esta regla dicta que el trabajo se programará de acuerdo con el tiempo de procesamiento restante antes de que el trabajo se considere completo. Cuanto menos tiempo le quede en un puesto de trabajo, antes entrará en el programa de producción.
- Menor número de operaciones restantes (Fewest Operations Remaining, FOR). Esta regla es otra variante del SPT, tiene en cuenta el número de operaciones sucesivas que quedan hasta que el trabajo se considere completo. El trabajo con menos operaciones pendientes se procesará primero.
- Tiempo de holgura (Slack Time, ST). Esta regla es una variante del EDD, utiliza una variable conocida como holgura. La holgura se calcula restando la suma de tiempos de Set Up y tiempos de procesamiento del tiempo restante hasta la fecha de vencimiento de la tarea. Los trabajos se ejecutan en el orden de menor holgura.
- Tiempo de holgura por operación (Slack Time per operation, ST / S). Esta es una variante de ST. El tiempo de holgura se divide por el número de operaciones que quedan hasta que el trabajo se ha completado, los trabajos con los resultados más pequeños se procesan primero.
- Siguiendo cola (Next queue, NQ). NQ se basa en la utilización de la máquina. La idea es tener en cuenta las colas de espera en cada una de las estaciones sucesivas a la que irán los trabajos. Entonces se selecciona el trabajo y se envía a la cola más pequeña, ya sea medido en horas o trabajos.

- Menor Set Up (Least Set Up, LSU). Esta regla trata de maximizar la utilización. El proceso programa en primer lugar el trabajo que minimiza el tiempo de Set Up en una máquina determinada.

Estas normas suponen que el tiempo de Set Up y los costes de instalación son independientes de la secuencia de procesamiento. Sin embargo, este no es siempre el caso. Los trabajos que requieren configuraciones similares pueden reducir los tiempos de Set Up, si se secuencian consecutivamente. Además de este supuesto, las reglas de prioridad también asumen que el tiempo de preparación y los tiempos de procesamiento son deterministas y no variarán, no habrá interrupciones en el procesamiento, también que se conoce el conjunto de trabajos y que no habrá nuevos trabajos que lleguen después de que comience el procesamiento y que no se cancelará ninguno de los trabajos. Si bien poco de esto es cierto en la práctica, estas suposiciones hacen posible que el problema de programación sea manejable.

3.4 EL CONCEPTO DEL JOB SHOP.

El objetivo de la producción es transformar la materia prima en productos elaborados que satisfagan las necesidades de los clientes. Para ello es necesario disponer de un lugar físico donde confluyan materiales, personas y máquinas. Será fundamental que dicho lugar se organice de acuerdo a las necesidades del producto fabricado y cómo se realicen los flujos de piezas a través del taller.

Según (Pinedo, 1995) podemos identificar tres casos:

- I. Flow Shop: Todas las piezas siguen la misma ruta, las máquinas están en serie y cada trabajo pasa por cada una de ellas, cuando un trabajo termina de ser procesado en una máquina pasa a la siguiente máquina.
- II. Job Shop: Cada pieza tiene una ruta conocida, dicha ruta puede estar compuesta por todas las máquinas o por un grupo de ellas.
- III. Open Shop: Cada operación debe realizarse en su máquina asignada, pero el orden de las operaciones de las piezas es indiferente.

Al ser la configuración Job Shop la utilizada por la empresa bajo estudio nos centraremos en esta. En una configuración Job Shop se hacen pequeños lotes de una variedad de productos personalizados. Normalmente en este tipo de configuración la mayoría de productos producidos requieren un único Set Up y tiempo de proceso en cada estación. Habitualmente este tipo de configuración se encuentra en las empresas que llevan a cabo la fabricación de piezas por encargo para otras empresas. Sin embargo,

también se incluyen una amplia gama de negocios, una tienda de herramientas de máquinas, centros de mecanizado, talleres de pintura, imprentas comerciales, y otros fabricantes que hacen productos personalizados en lotes pequeños. Estas empresas se ocupan en la personalización y poseen una producción relativamente pequeña, no compiten en volumen o estandarización.

Las características clave según (Chase, Aquilano & Jacobs, 2001) en la configuración Job Shop son:

- Disposición (Layout): En Job Shop, los equipos o funciones similares se agrupan juntos, así todos los taladros se agrupan en una misma área y máquinas rectificadoras en otra área, siguiendo una disposición según proceso. Esta disposición se ha diseñado para reducir al mínimo la manipulación de materiales, costes y los inventarios de trabajos en proceso. En la configuración Job Shop se utilizan equipos de uso general en lugar de equipos dedicados a un producto específico. A menudo se utilizan equipos de control numérico para proporcionar a los talleres mayor flexibilidad y rapidez a la hora de Set Up en las diferentes máquinas. Debido a que las economías de escala, por lo general, no forma parte de la ventaja competitiva de un taller Job Shop estos deben centrarse en otros factores distintos al precio. Compiten en calidad, velocidad de entrega del producto, la personalización y la introducción de nuevos productos.
- Ruta (Routing): Cuando llega un pedido a un taller Job Shop, la pieza se procesa a través de las diferentes áreas de acuerdo a una secuencia de operaciones. No todos los trabajos usarán todas las máquinas de la planta. Los trabajos a menudo viajan en un revoltijo de rutas pudiendo volver a la misma máquina para ser procesada varias veces. Este tipo de diseño se observa también en servicios como grandes almacenes u hospitales, donde las áreas se dedican a un producto en particular (ropa de caballero) o un tipo de servicio (sala de maternidad).
- Trabajadores: Los empleados en un taller Job Shop poseen una alta cualificación ya que se requiere una alta maestría para la ejecución de los trabajos pudiendo operar diferentes clases de maquinaria. A estos trabajadores se les paga salarios más altos debido a sus niveles de habilidad. Esto también supone que los empleados de Job Shop necesiten menos supervisión.
- Información: La información es uno de los aspectos más críticos de un taller Job Shop. La información es necesaria para acordar un precio, mandar un pedido, enviar la orden a través del taller y especificar el trabajo exacto que hay que hacerse. La información comienza con un pedido, a continuación, se preparan la hoja de trabajo y el modelo antes de que la orden se envíe al taller. Una vez en la planta de producción, los empleados completan las hojas de trabajo y tarjetas de tiempo para el cálculo de los costes laborales y para actualizar los registros para futuros trabajos que tengan variaciones. Si bien a menudo es fácil ofertar trabajos fabricados anteriormente, los nuevos trabajos requieren costes precisos de la mano de obra, materiales y

equipos, así como una asignación precisa de los gastos generales para el trabajo. Las tarjetas de información siguen a cada puesto de trabajo a través del taller, donde se van registrando el tiempo y las operaciones.

- Programación (Sheduling): Un trabajo se caracteriza por su secuencia, sus requisitos de procesamiento, y su prioridad. En un Job Shop la mezcla de productos es un tema clave en la decisión de cómo y cuándo programar trabajos. Los trabajos no pueden ser completados en función de su patrón de llegada con el fin de reducir al mínimo los Set Up y cambios de formato. El trabajo también puede ser programado basándose en otras reglas como el tiempo de procesamiento, por ejemplo la regla vista anteriormente SPT, ordenándose del tiempo más corto al más largo. La capacidad es difícil de medir en un taller Job Shop y depende de los tamaños de lote, complejidad de los trabajos, mezcla de trabajos ya programados, habilidad de programación de los trabajos, el número de máquinas y su condición, la cantidad y la calidad de mano de obra, y cualquier mejora en los procesos.

3.4.1 SOLUCIONES A ENTORNOS JOB SHOP.

En esta subsección se expondrán dos interesantes estudios recientes relacionados con entornos Job Shop y las conclusiones aportadas por los investigadores, así se pretende aportar distintos enfoques de resolución para un mismo tipo de configuración de taller. El primero de los estudios aplica una metaheurística basada en población y el segundo compara distintas reglas de despacho simples e híbridas.

A continuación se realizará un resumen del estudio realizado por (González, Vela & Varela, 2015) en donde se resolvía en problema Flexible Job Shop Scheduling Problem, FJSSP que incorpora la posibilidad de considerar un conjunto de máquinas para realizar una operación determinada. Se trata de un modelo más complejo que el Job Shop, puesto que añade el problema de escoger la asignación de cada una de las operaciones a una de las máquinas del centro de trabajo. Los investigadores aplicaron un algoritmo basado en scatter search con path relinking y tabu search, definido como SSPR.

La clave de este problema es qué trabajos asignar primero a qué máquina para minimizar el makespan (tiempo total de terminación de los trabajos). Tras formular el algoritmo los autores compararán los actuales métodos que se aplican a FJSP con el que ellos proponen.

En cuanto a las estructuras de vecindad los autores proponen analizar cómo afectaría un cambio en las operaciones (de los diferentes trabajos) en una máquina (subproblema de secuenciación), y también

cambiar la asignación de la máquina de las operaciones (subproblema de asignación). Para ver como afectarían estos cambios veremos un caso práctico con tres trabajos y tres máquinas aplicando el diagrama de Gantt, $O_{\text{trabajo-operación}}$.

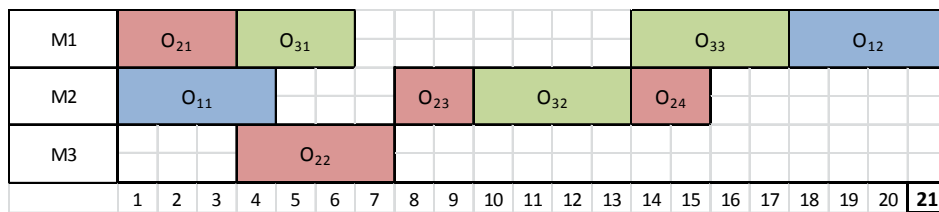


Figura 2 Caso práctico estructura de vecindad

- Subproblema de secuenciación: Se basa en un cambio de las operaciones dentro de una máquina siempre y cuando éstas operaciones sean de diferentes trabajos, el cambio consiste en colocar la última operación delante de su predecesora, comprobando que este movimiento se puede realizar sin empeorar en makespan. Para realizarse el cambio se comprueba primero que el tiempo de proceso de la segunda operación es menor que la de la primera, y si es así se cambian de posición. También cabe la posibilidad de que las operaciones, inicial y final, de un mismo trabajo (que forman un bloque) en una máquina se puedan intercambiar entre ellas para así la misma operación en otra máquina se pueda adelantar o atrasar, mejorando en makespan.

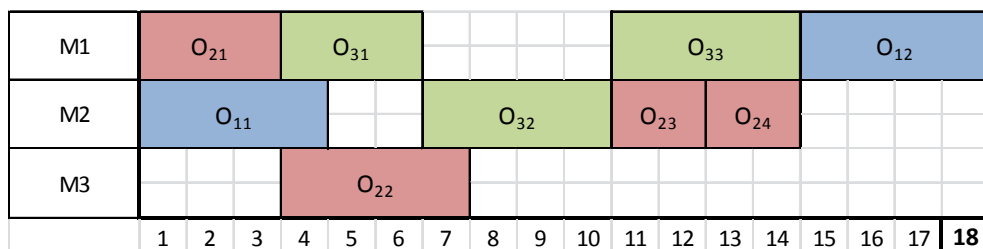


Figura 3 Subproblema de secuenciación

- Subproblema de asignación: Este subproblema consiste en una solución muy simple, cambiar la asignación de las operaciones a las máquinas, así podríamos mejorar el makespan asignando operaciones a máquinas que están ociosas.

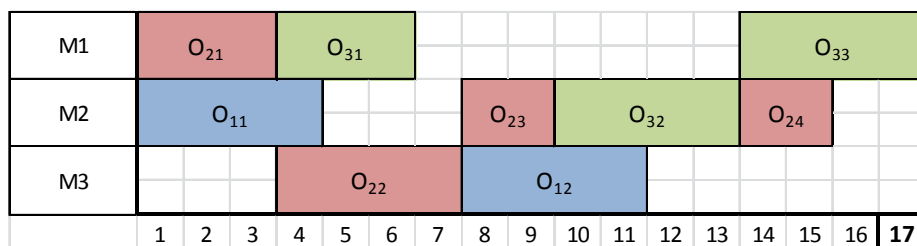


Figura 4 Subproblema de asignación

- Combinación de ambos subproblemas: Ambos subproblemas serán utilizados de manera conjunta posteriormente en el algoritmo propuesto en el artículo SSPR.
- Estimación del makespan: Para calcular el makespan se buscará la primera operación que se realiza y se calculará la duración hacia el final de la última operación

La metaheurística utilizada en Scatter Search (SS) es un método basado en población, es un excelente método ya que es un método rápido, poco overhead (tiempo de cálculo dependiente de la dificultad del algoritmo), y determinista (proporciona las mismas soluciones si se hace dos veces). El método SS consiste en 6 fases: Medida de diferencia, construcción inicial del conjunto de referencia, método de generación del subconjunto y diversificación, método de combinación de soluciones, método de mejora y por último la actualización del conjunto de referencia.

- I. Medida de diferencia: Para calcular la distancia entre soluciones debemos medir la diferencia entre ellas, así una de esas soluciones representa la diferencia en el subproblema de secuenciación y la otra solución la diferencia en el subproblema de asignación.
 - La diferencia en el subproblema de secuenciación se mide como el número de pares de operaciones que requieren la misma máquina.
 - La diferencia en el subproblema de asignación se define como el número de operaciones que tienen una asignación de máquina diferente.

Para saber la mínima diferencia entre dos soluciones se utiliza una relación de precedencia, la solución 1 será mejor si su diferencia en el subproblema de secuenciación es menor que el de la solución 2. En el caso que dicha diferencia sea igual la mejor solución será aquella que posea menor diferencia en el subproblema de asignación.

- II. Construcción inicial del conjunto de referencia: Este conjunto debe contener las soluciones de mayor calidad y diversidad posible. Para conseguirlo se genera un conjunto de soluciones aleatorias siendo mejoradas con Tabu Search (TS) y se seleccionan de entre éstas las que formarán parte del conjunto de referencia. Para seleccionarlas garantizando la diversidad la mitad del conjunto de referencia se compone con las soluciones que tengan unas diferencias (ver fase anterior) mayores a unos parámetros prefijados. La otra mitad del conjunto de referencia se forma con las soluciones con menor makespan. Si no se completa el conjunto de referencia con las restricciones anteriores se completa con soluciones aleatorias.
- III. Método de generación del subconjunto y diversificación: Para la generación del subconjunto cada par de soluciones del conjunto de referencia es combinado (ver siguiente fase) para crear una nueva solución, tras esto se le aplica TS (ver fase: actualización del conjunto de referencia). Una vez que no se pueden crear nuevas soluciones con la combinación de pares, se procede con

la diversificación, se eliminan todas las soluciones del conjunto inicial y se construye con la mejor solución obtenida más soluciones aleatorias, se aplica TS y después se procede como en la fase anterior.

- IV. Método de combinación de soluciones: Se aplica path relinking (PR). El PR consiste en combinar dos soluciones una inicial y otra guía para obtener una nueva solución, se realizan movimientos desde la solución inicial hacia la guía y cada movimiento es una nueva solución. En el algoritmo propuesto la solución inicial es siempre la mejor de las dos soluciones cogidas del conjunto de referencia. Para decidir el siguiente movimiento se escoge la mejor solución del SP. De asignación y del SP. De secuenciación en términos de distancia hacia la solución guía y entre estas dos soluciones las que tenga menor makespan.
- V. Método de mejora: El algoritmo propuesto utiliza Tabu Search (TS) como método de mejora. TS se fundamenta en una serie de iteraciones sobre una solución inicial que consisten en crear una vecindad de soluciones según el SP. De Asignación y el SP. De Secuenciación y seleccionar la solución con mejor makespan, el método TS termina tras un número predefinido de iteraciones sin mejora. Ya que las soluciones de las iteraciones se almacenan para ser comparadas con las demás es de vital importancia prefijar un límite de soluciones almacenadas así como un límite de tiempo en la búsqueda, buscando siempre un equilibrio entre diversificación y estrés computacional.
- VI. Actualización del conjunto de referencia: La actualización se produce según una variante dinámica, es decir, que cada solución resultante del PR y mejorado con TS reemplazará a la peor solución del conjunto se referencia siempre que el makespan de la nueva solución sea mejor que el de la peor solución.

Al aplicar el algoritmo propuesto se han predefinido ciertos parámetros tales como el tamaño del conjunto de referencia 8 (siempre menor de 20), el tamaño del conjunto inicial 20, máximo de fallos en el PR 15, e iteraciones sin mejora en el TS 2000, mínima diferencia en el SP. De secuenciación 20 y en el SP. De asignación 3. Finalmente el número de iteraciones sin mejora del algoritmo es de 250.

En comparación con otros métodos se han obtenidos mejores resultados tanto en tiempo computacional como en minimización del makespan, en un total de 178 casos de FJSP el algoritmo propuesto SSPR obtiene las mejores soluciones encontradas hasta la fecha en 175 casos.

En el estudio se (Kaban, Othman & Rohmah, 2012) se simulaba a través de ARENA un caso de estudio aplicando 44 reglas de despacho 14 reglas simples y 30 combinadas. En el caso propuesto hay 14 máquinas y 10 productos distintos.

Nº	Regla	Descripción	Tipo
1	FIFO	First In First Out	Estática
2	LIFO	Last In First Out	Estática
3	SPT	Shortest Processing Time	Estática
4	LPT	Longest Processing Time	Estática
5	SPS	Shortest Process Sequence	Estática
6	LPS	Longest Process Sequence	Estática
7	STPT	Shortest Total Processing Time	Estática
8	LTPT	Longest Total Processing Time	Estática
9	ECT	Earliest Creation Time	Dinámica
10	LCT	Longest Creation Time	Dinámica
11	SWT	Shortest Waiting Time	Dinámica
12	LWT	Longest Waiting Time	Dinámica
13	LTWR	Least Total Work Remaining	Dinámica
14	MTWR	Most Total Work Remaining	Dinámica

Tabla 4 Reglas de despacho seleccionadas

Tras la simulación se analizó la relación entre las piezas en proceso y las diferentes reglas de despacho, (Work In Process, WIP), como puede observarse la regla LWT ofrece el mejor rendimiento mientras que la regla LPT el peor.

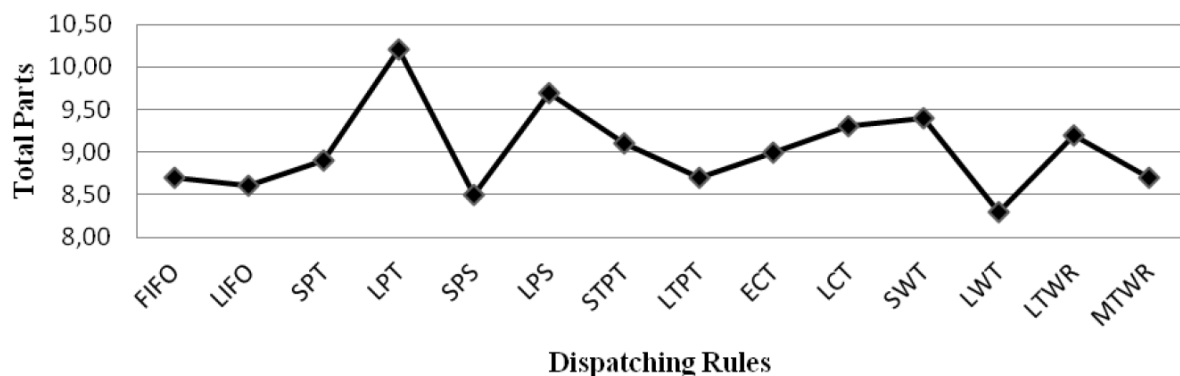


Figura 5 Rendimiento de cada regla de despacho con WIP

A continuación, se muestra el rendimiento de las reglas frente al tiempo de espera en cola de las piezas para ser procesadas. La gráfica muestra como la regla SPT obtiene en mejor rendimiento minimizando el tiempo de cola (Queue time) mientras que la regla LPS crea el mayor tiempo de cola en el sistema. La regla MTWR tiene el mejor rendimiento minimizando la longitud de la cola, siendo la regla LPT la peor regla mejorando este parámetro.

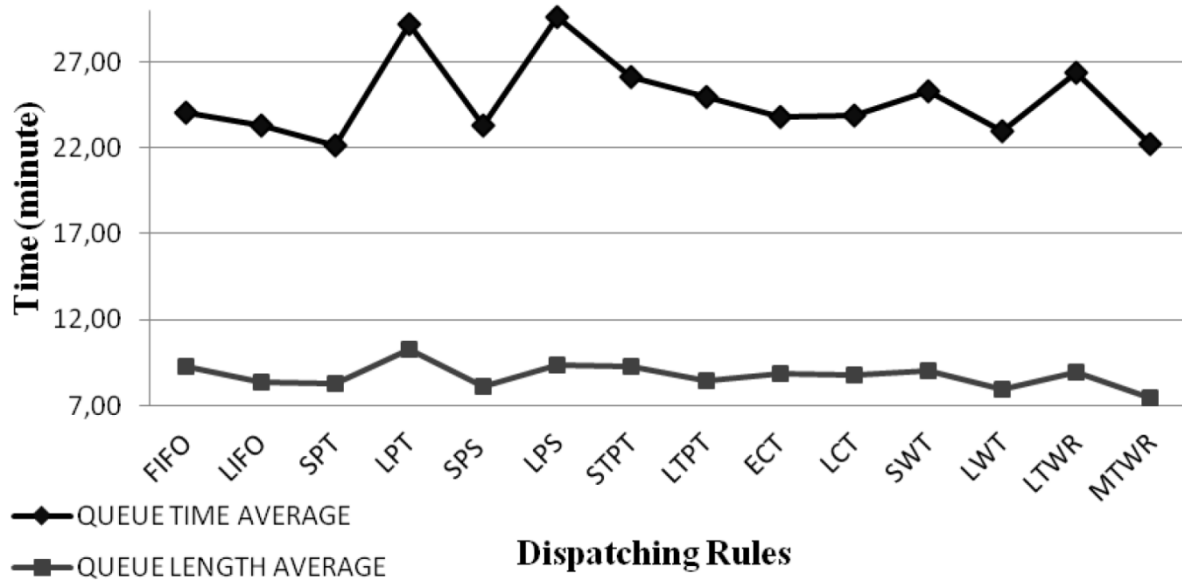


Figura 6 Rendimiento de cada regla con respecto al tiempo de espera en cola

La figura siguiente muestra un patrón similar entre makespan (cantidad total de tiempo necesario para completar un grupo de trabajos) y el tiempo medio de espera. Esto significa que la regla que sea capaz de reducir al mínimo el tiempo medio de espera minimizará simultáneamente el tiempo makespan o total que se requiera para terminar todos los trabajos en el sistema. La regla MTWR resulta ser la mejor regla para minimizar ambos parámetros. En este experimento, es inesperado descubrir que los mejores resultados esperados según la literatura serían los de la regla SPT, no aporta un mejor desempeño que la regla MTWR en la minimización de makespan en este tipo de programación Job shop.

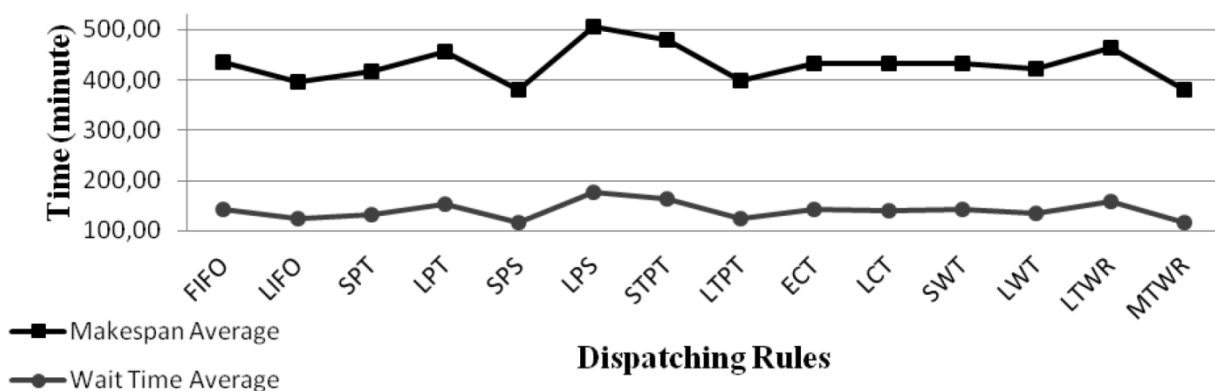


Figura 7 Rendimiento de cada regla según makespan y tiempo de espera

Tras observar las figuras la regla MTWR ofrece un mejor rendimiento para casi todos los parámetros medidos. Mientras que la regla SPT provee también buenos resultados, siendo la regla LPT la peor regla para la mayoría de parámetros medidos, obteniéndose en la simulación resultados similares a los de la literatura. La siguiente figura se muestra el ranking de las reglas simples aplicadas, cuanto más bajo sea su puntuación mejor será su rendimiento.

Rules	<i>WIP AV</i>	<i>TT AV</i>	<i>WT AV</i>	<i>QT AV</i>	<i>QL AV</i>	Total Rank
FIFO	4	10	10	8	11	43
LIFO	3	3	3	4	5	18
SPT	5	4	5	1	4	19
LPT	12	11	11	13	14	61
SPS	2	2	2	5	3	14
LPS	11	14	14	14	13	66
STPT	7	13	13	11	11	55
LTPT	4	4	4	9	6	27
ECT	6	9	9	6	8	38
LCT	9	7	7	7	7	37
SWT	10	8	8	10	10	46
LWT	1	6	6	3	2	18
LTWR	8	12	12	12	9	53
MTWR	4	1	1	2	1	9

WIP AV = Work In Progress Average

TT AV = Total Time Average

WT AV = Waiting Time Average

QT AV = Queue Time Average

QL AV = Queue Length Average

Figura 8 Ranking de reglas de despacho

En el estudio también se calcularon los mismos parámetros que los anteriores pero con reglas de despacho híbridas.

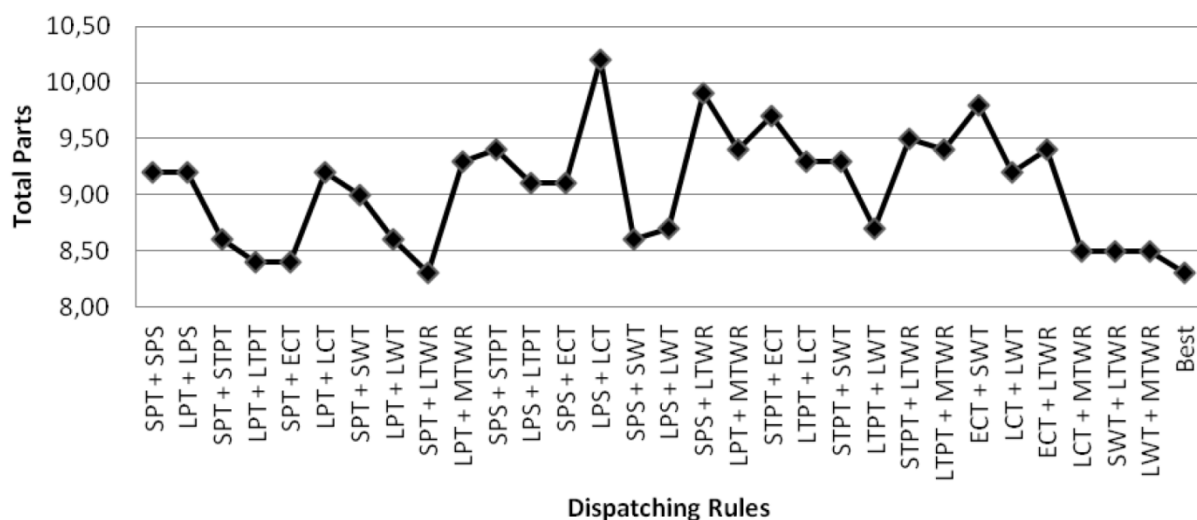


Figura 9 Rendimiento de cada regla de despacho híbrida con WIP

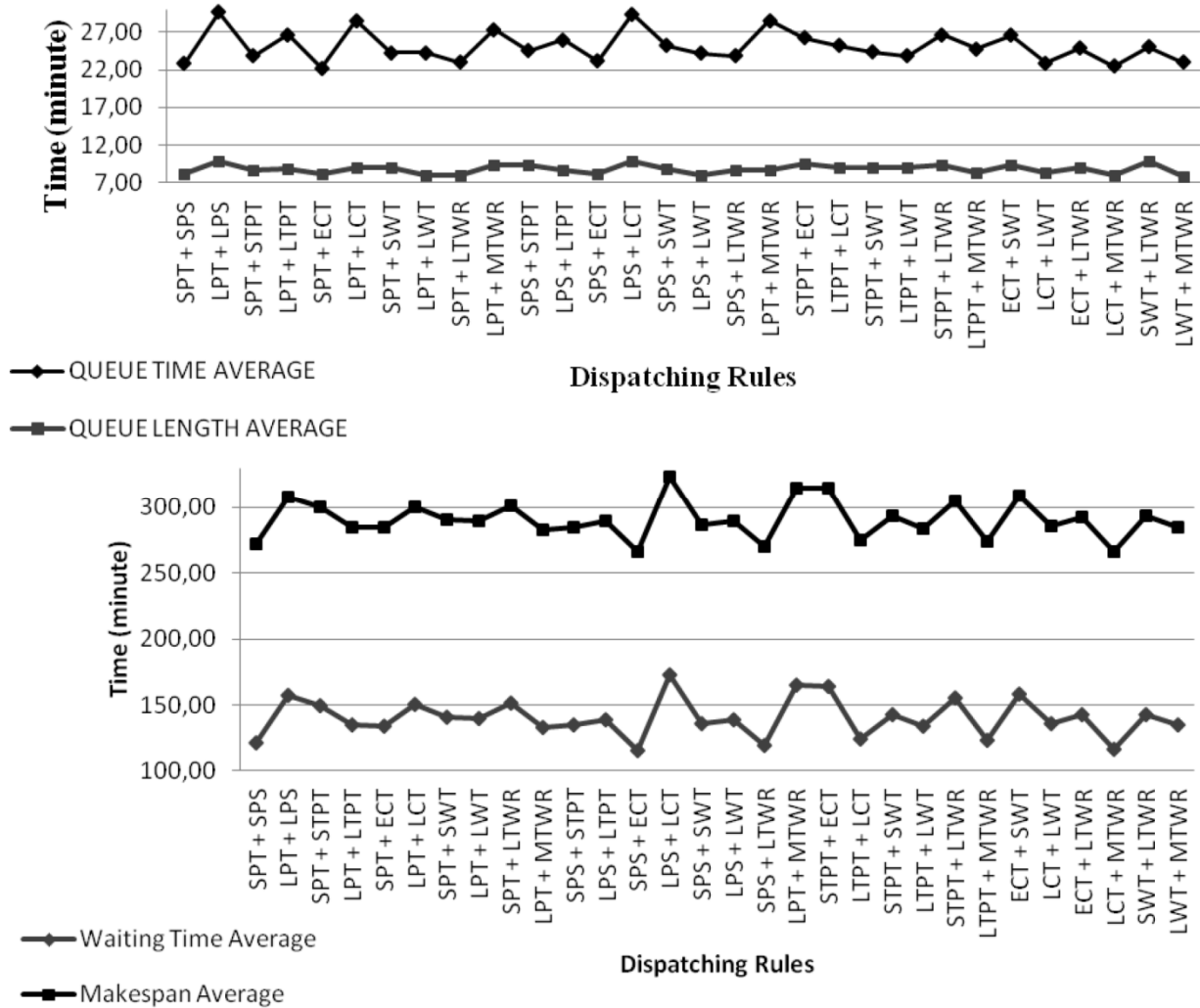


Figura 10 Rendimiento de cada regla híbrida respecto al tiempo de cola y makespan

Referente a las reglas de despacho híbridas, la combinación entre el SPT y LTWR fue capaz de ofrecer mejores rendimientos en criterios de trabajo en curso (WIP). En cuanto a makespan y tiempo de espera, la combinación entre la SPS y ECT muestra el mejor rendimiento. Lo mismo sucede con una sola regla, la regla que pueda minimizar el makespan también es capaz de reducir al mínimo el tiempo de espera. La regla híbrida SPT y la ECT muestra el mejor rendimiento en el tiempo de cola y la regla híbrida entre LWT y MTWR muestra el mejor rendimiento para la longitud media de cola. Todas las reglas híbridas se comparan entonces con respecto a todos los parámetros de desempeño para determinar las reglas que se desempeña mejor en las mediciones. Como se puede apreciar en la siguiente figura, la combinación entre la LCT y MTWR ofrece el mejor rendimiento para casi todas las mediciones. La combinación entre la SPS y la ECT también muestra un buen desempeño, seguido de SPT y SPS. Mientras tanto, la combinación de LPS y LCT da el peor rendimiento para la mayoría de las mediciones, muestra la peor clasificación en casi todos los criterios.

Rules	<i>WIP AV</i>	<i>TT AV</i>	<i>WT AV</i>	<i>QT AV</i>	<i>QL AV</i>	Total Rank
SPT+SPS	8	4	4	3	6	25
LPT+LPS	8	26	26	30	28	118
SPT+STPT	4	22	22	10	13	71
LPT+LTPT	2	12	12	24	16	66
SPT+ECT	2	9	9	1	6	27
LPT+LCT	8	23	23	28	19	101
SPT+SWT	6	18	18	13	17	72
LPT+LWT	4	17	17	12	2	52
SPT+LTWR	1	24	24	5	3	57
LPT+MTWR	9	7	7	26	24	73
SPS+STPT	11	10	11	15	24	71
LPS+LTPT	7	16	16	21	11	71
SPS+ECT	7	1	1	7	6	22
LPS+LCT	15	30	30	29	30	134
SPS+SWT	4	14	14	19	15	66
LPS+LWT	5	15	15	11	3	49
SPS+LTWR	14	3	3	9	13	42
LPS+MTWR	11	29	29	27	11	107
STPT+ECT	27	28	29	22	27	133
LTPT+LCT	9	6	6	20	19	60
STPT+SWT	9	20	20	14	17	80
LTPT+LWT	5	8	8	8	19	48
STPT+LTWR	12	25	25	25	23	110
LTPT+MTWR	11	5	5	16	9	46
ECT+SWT	13	27	27	23	24	114
LCT+LWT	8	13	13	4	10	48
ECT+LTWR	10	19	19	17	22	87
LCT+MTWR	3	2	2	2	3	12
SWT+LTWR	3	21	21	18	28	91
LWT+MTWR	3	11	10	6	1	31

Figura 11 Ranking reglas de despacho híbridas

Tras comparar las 44 reglas de las cuales 14 reglas eran simples y 30 híbridas para determinar cuál es la regla que ofrece mejor rendimiento el resultado ha mostrado que ninguna regla simple mejora eficazmente todos los parámetros. La combinación entre MTWR y LCT resultó ser la mejor regla de combinación y que la regla MTWR resulta ser la mejor regla simple entre todas las reglas simples. El resultado también indica que las reglas híbridas no generan los mejores resultados en comparación con las reglas de despacho simples.

4. SIMULACIÓN

Tras explicar en capítulos anteriores los métodos matemáticos que se aplican para intentar optimizar los SFF explicaremos una nueva herramienta para aplicar a dicho sistema, la simulación, esta herramienta responde a la pregunta: “¿Qué pasaría si...?” así la aplicación de la simulación consiste en estudiar qué efectos provocaría en el sistema determinados cambios, la simulación puede enfocarse de dos formas distintas: o intentar simular cómo va a reaccionar a largo plazo el sistema tras un cambio en el sistema real o cómo reaccionaría el sistema real a un cambio aplicado primero en una simulación. También es de gran utilidad para analizar las variables de control del sistema con el objetivo de encontrar unos valores óptimos de estas.

4.1 CONCEPTOS BÁSICOS DE SIMULACIÓN.

En esta sección veremos qué es y cuál es el origen de la simulación, qué es un modelo de simulación y su clasificación y los campos de aplicación de la simulación.

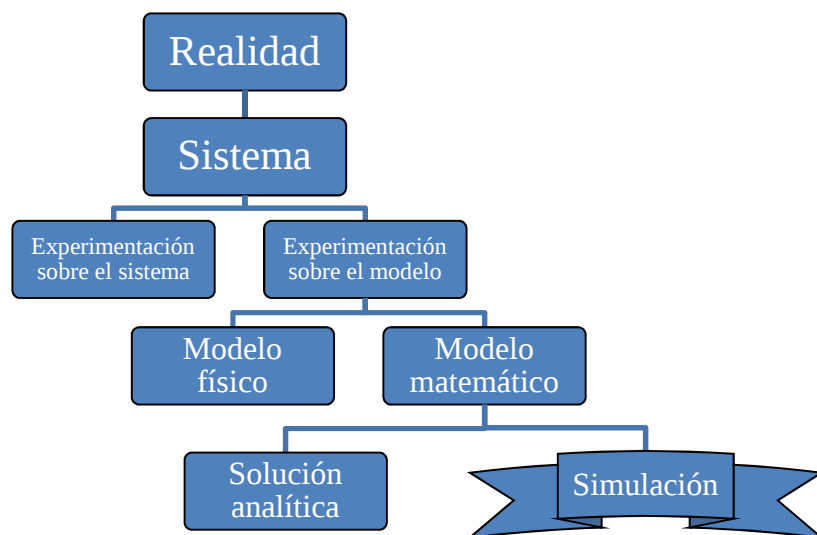


Figura 12 Métodos de análisis

4.1.1 DEFINICIONES

El uso moderno del término Simulación se debe a Von Neumann y Ulman cuando, tras la Segunda Guerra Mundial, definieron como método de Monte Carlo a la técnica matemática que resolvía ciertos problemas físicos (como la difusión aleatoria de los neutrones) que resultaban costosos de realizar experimentalmente y difíciles de resolver analíticamente. Los métodos de Monte Carlo consisten en utilizar el muestreo estadístico para generar soluciones a las ecuaciones diferenciales que gobiernan ciertos sistemas físicos. Con la llegada de los ordenadores de alta velocidad a comienzos de los 50, la simulación alcanza otro significado al poderse experimentar sobre modelos matemáticos que describan cualquier sistema real complejo. La simulación mediante ordenador fue introducida en las universidades en los años 60, y los libros y publicaciones sobre el tema aparecieron en la misma época. El carácter multidisciplinar de la simulación es evidente por el hecho de que el tema se trata por diferentes departamentos en distintas universidades del mundo.

Son varias las definiciones dadas por los científicos al término Simulación dependiendo del enfoque que se utilice. (Churchman, 1963) ofrece una definición muy estricta del término:

“x simula a y” si: (i) x e y son sistemas formales, (ii) y se toma como sistema real, (iii) x se toma como una aproximación del sistema real, y (iv) las reglas de validación de x están libres de errores.

En general se suele utilizar una definición menos precisa pero más práctica. La definición dada por (Shubik, 1960) es más general y admitida por los científicos:

La simulación de un sistema consiste en el funcionamiento de un modelo o simulador, que es una representación del sistema a estudiar. El modelo permite manipulaciones que serían imposibles, demasiado costosas o impracticables realizar sobre el sistema real. El funcionamiento del modelo puede ser estudiado para inferir propiedades respecto al comportamiento del sistema real o de sus subsistemas.

Un *sistema* se define como un grupo de objetos que se encuentran relacionados por algún tipo de interacción o interdependencia con el fin de cumplir un propósito determinado. Un ejemplo de esto sería una cadena de montaje dentro de una fábrica, donde cada máquina es una entidad independiente de las demás pero relacionada con ellas para conseguir el objetivo de obtener el producto final. Un sistema a menudo está afectado por cambios que se producen fuera de él.

Estos cambios se denominan *entorno* del sistema. A la hora de modelar el sistema es necesario definir los límites entre dicho sistema y su entorno. Esta decisión puede depender del propósito del estudio que se vaya a realizar.

Los sistemas pueden ser de dos tipos: *discretos* o *continuos*. Los sistemas discretos son aquellos en que las variables que definen el estado del mismo cambian en distintos instantes de tiempos (por ejemplo, un proceso de fabricación en serie, donde las piezas llegan cada cierto tiempo y las máquinas cambian de estado cuando inician y terminan de procesar una pieza). En los sistemas continuos las variables de estado cambian de forma continua a lo largo del tiempo (por ejemplo, el movimiento de los vehículos en una red urbana, donde la posición y velocidad pueden cambiar de forma continua respecto al tiempo). Normalmente los sistemas son híbridos pues existen variables de los dos tipos, pero en general en cada sistema tiende a dominar uno de los tipos anteriores.

Diversos ejemplos de sistemas:

- Fábricas, cadenas de montaje.
- Servicios públicos, bancos, hospitales, oficinas,...
- Logística y distribución.
- Sistemas de ordenadores y de telecomunicación.
- Operaciones militares.
- Obras de infraestructura.
- Economía de una región.

4.1.2 MODELOS DE SIMULACIÓN.

La definición de modelo que ofrece la Real Academia de la Lengua Española en una de sus acepciones es bastante aceptada en simulación: *“esquema teórico, generalmente en forma matemática, de un sistema o de una realidad compleja, que se elabora para facilitar su comprensión y el estudio de su comportamiento”*. La ventaja que ofrece un modelo es la posibilidad de experimentar sin modificar las condiciones del sistema, siendo a veces su realización imposible o excesivamente costosa, e incluso puede que el sistema que se desea analizar no exista por ser un estudio de diseño.

Cuando se habla de la palabra modelo, la mayoría de la gente piensa en una maqueta de un coche en un túnel de viento, en la cabina de vuelo desconectada del avión o en una miniatura de un petrolero en una piscina. Estos son ejemplos de modelos físicos o icónicos, donde existe una semejanza física entre el sistema y el modelo. Este tipo de modelos no son de interés en el ámbito de la investigación operativa, aunque a veces se han desarrollado modelos a escala en producción como por ejemplo en un sistema de manejo de materiales. Los modelos que interesan en este estudio son los matemáticos o lógicos, donde el sistema se representa mediante relaciones lógicas y cuantitativas. A modo de ejemplo, el diagrama de flujo de un programa representa de forma simbólica la relación lógica de un sistema. Un modelo de programación lineal puede ser otro ejemplo de la representación matemática de los elementos del sistema.

Una vez construido un modelo matemático que representa el sistema, es necesario examinarlo para poder encontrar las respuestas a las preguntas que interesen de dicho sistema. Si el modelo matemático es simple, se podrá encontrar una solución analítica del mismo, que será la mejor solución para las variables de salida que miden los objetivos del sistema. A veces no es posible encontrar soluciones analíticas del sistema por la complejidad del modelo matemático, o bien no es posible plantear un modelo matemático válido por la complejidad del sistema. En tales casos el modelo debe estudiarse mediante simulación, es decir, planteando un modelo con una serie de datos de entrada y obteniendo valores de las variables de salida.

Los modelos de simulación, como ya se ha comentado, son todos modelos matemáticos, pero es interesante realizar una clasificación de los mismos según su comportamiento:

- *Discretos o Continuos:* De igual manera que se definieron los sistemas discretos y continuos, dependen de las variables del modelo, en especial de la variable que mide el tiempo. En un proceso químico, la temperatura cambia de forma continua en el tiempo, mientras que en los modelos de colas los valores de las variables cambian en ciertos instantes de tiempo. Hay que hacer notar que un modelo discreto no siempre se usa para modelar un sistema discreto ni viceversa.
- *Estocásticos o Deterministas:* Si en un modelo de simulación no existen elementos aleatorios, se denomina determinista. Una vez que se establezcan los valores de las variables de entrada y las relaciones en un modelo determinista, queda completamente definido dicho sistema para encontrar la solución al mismo. Sin embargo muchos sistemas deben ser modelados utilizando variables de entrada aleatorias, dando lugar a los modelos estocásticos. Un modelo de un supermercado, donde la llegada de los clientes sigue una distribución estadística es un ejemplo de modelo estocástico, frente a un sistema de fabricación flexible, donde en condiciones normales los tiempos de procesado no varían.
- *Estáticos o Dinámicos:* Un modelo estático representa un sistema donde no interviene el tiempo o no tiene valor esencial. En un modelo Dinámico se representa la evolución del sistema a lo largo del tiempo. Los modelos de Monte Carlo son estáticos frente a los modelos dinámicos que representan los transportes de piezas en fabricación.

Los modelos de simulación que centran la mayor atención de los científicos son discretos, estocásticos y dinámicos, denominándose modelos de simulación de eventos discretos.

4.1.3 CAMPOS DE APLICACIÓN DE LA SIMULACIÓN.

La disponibilidad de lenguajes específicos de simulación, ordenadores de elevada velocidad de cálculo, con una disminución del coste de operación, y los avances en métodos de modelado y simulación han permitido que ésta sea una de las herramientas más ampliamente utilizadas tanto en la investigación operativa como en el análisis de sistemas.

Las técnicas de simulación se pueden utilizar por los siguientes motivos:

- La simulación permite el estudio y la experimentación de las interacciones internas dentro de un sistema complejo.
- Se pueden observar y estudiar cambios producidos en el sistema. Estos cambios pueden ser del entorno, organizativos o de información.
- El conocimiento adquirido en el diseño del modelo que se va a simular permite sugerir mejoras en el sistema que se está investigando.
- Cambiando las entradas al modelo durante la simulación se puede ver cómo va evolucionando su respuesta, así como estudiar qué variables son más importantes y cómo interactúan.
- La simulación permite comprobar soluciones obtenidas por procedimientos analíticos.
- Se puede experimentar con nuevos diseños y políticas de uso antes de la implementación en la realidad y, así, preparar para lo que pueda pasar.

Los campos de aplicación de la simulación son diversos. En lugar de mostrar una lista exhaustiva de dichas aplicaciones, se van a enumerar algunas aplicaciones representativas:

- ✓ Sistemas de Computación: redes de ordenadores, componentes, programación, bases de datos, fiabilidad,...
- ✓ Fabricación: manejo de materiales, líneas de montaje, equipos de almacenamiento, control de inventario, mantenimiento, distribución en planta, diseño de máquinas,...
- ✓ Negocios: análisis de existencias, política de precios, estrategias de marketing, estudios de adquisición, análisis de flujo de caja, predicción, alternativas del transporte, planificación de mano de obra,...
- ✓ Gobierno: armamento y su uso, tácticas militares, predicción de la población, uso del suelo, prevención de incendios, servicios de policía, justicia criminal, diseño de vías de comunicación, servicios sanitarios,...

- ✓ Ecología y Medio Ambiente: contaminación y purificación del agua, control de residuos, contaminación del aire, control de plagas, predicción del tiempo, análisis de seísmos y tormentas, exploración y explotación de minerales, sistemas de energía solar, explotación de cultivos,...
- ✓ Sociedad y Comportamiento: estudios de alimentación de la población, políticas educativas, estructuras organizativas, análisis de sistemas sociales, sistemas de asistencia social, administración universitaria,...
- ✓ Biociencias: rendimiento en el deporte, control de epidemias, ciclos de vida biológicos, estudios biomédicos,...

La lista anterior muestra algunos de los campos de aplicación y sugiere la gran utilidad de la simulación para ayudar a resolver un amplio rango de problemas significativos. Como conclusión se puede asegurar que la simulación es una técnica efectiva para validar sistemas, planes o políticas a desarrollar antes de incurrir en elevados costes por el desarrollo de prototipos, test de campo o sistemas reales. Los gestores ven cada vez más la simulación como una técnica atractiva en la ayuda a la toma de decisiones.

4.2 PROYECTOS DE SIMULACIÓN.

En las siguientes subsecciones se explicarán cuáles son las etapas de un proyecto de simulación primero de forma esquematizada y posteriormente de forma detallada. Por último se expondrán las ventajas e inconvenientes de los proyectos de simulación.

4.2.1 ETAPAS DE UN PROYECTO DE SIMULACIÓN.

Los pasos que hay que realizar para desarrollar un proyecto de simulación varían según el autor según (Eguía. I & Racero. Jesús, 2015) un posible orden según un diagrama de flujo pudiera ser el siguiente, además de una explicación posterior más detallada:

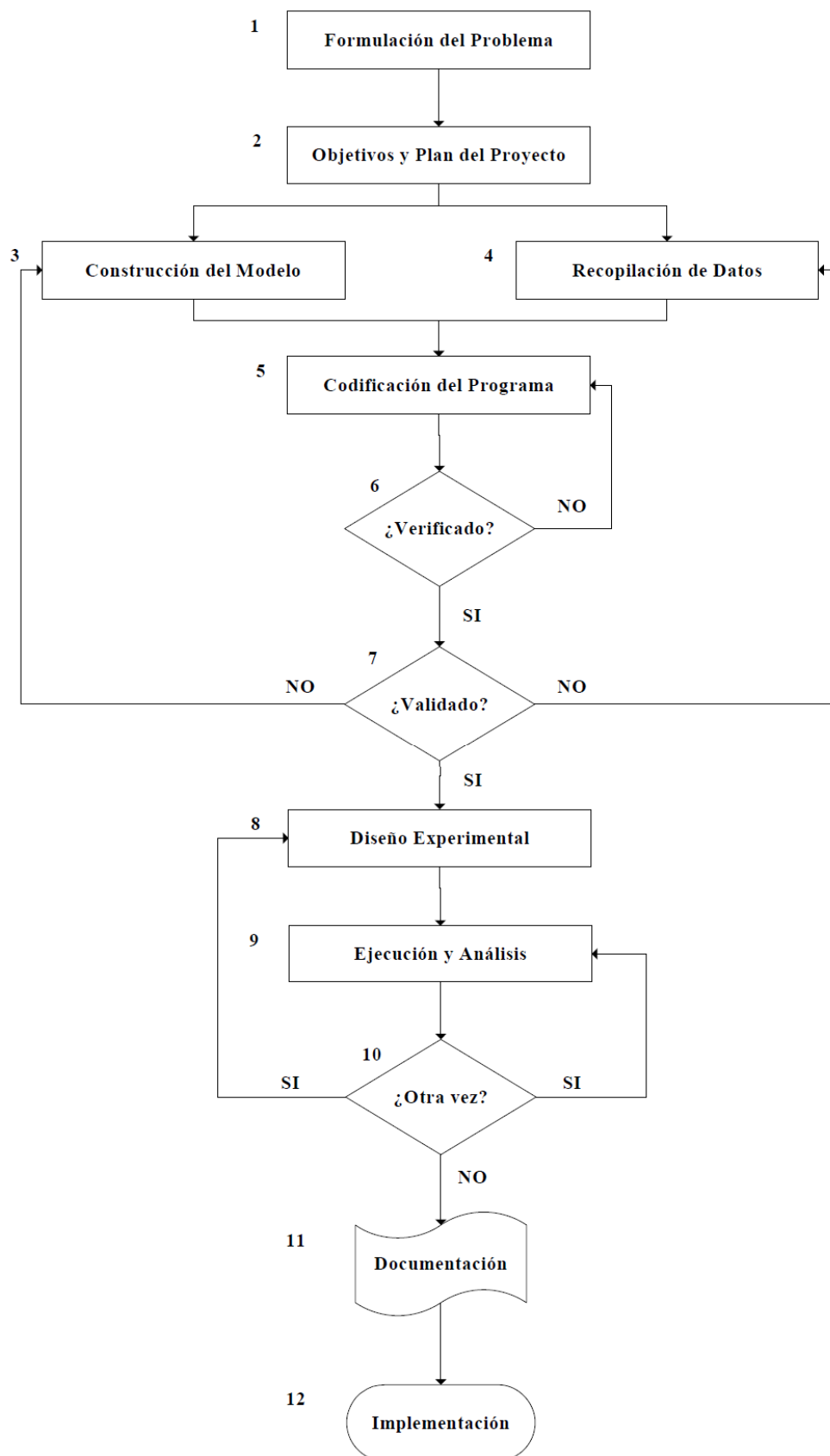


Figura 13 Etapas de un proyecto de simulación.

Una explicación más detallada de cada paso se da a continuación:

1. *Formulación del problema.* Todo estudio debe comenzar con una definición del problema, acotándolo tanto física como temporalmente. En este momento el analista debe conocer perfectamente todos los aspectos del sistema que va a estudiar. Hay que tener en cuenta que hay muchos casos en los que conviene reformular el problema a medida que se avanza en su estudio.
2. *Establecimiento de los objetivos y plan del proyecto.* Los objetivos indican las cuestiones que se van a estudiar en la simulación. En este punto es donde se determina si la simulación va a ser una herramienta apropiada o no. Si se decide que sí es apropiada entonces sería recomendable tener en cuenta otras alternativas distintas que pudieran ser utilizadas como un método de evaluación o verificación. Para terminar el plan del proyecto es necesario tener en cuenta su coste, el número de personas involucradas en el mismo y el número de días que llevará realizar cada fase del proyecto.
3. *Construcción del modelo.* La construcción del modelo es quizás la etapa menos científica y más “artística” pues no existe un guion general. Para la formulación del modelo de simulación es necesario recoger las características esenciales del sistema objeto de estudio, seleccionar y modificar de forma adecuada suposiciones básicas que caracterizan el sistema y, entonces elaborar el modelo para conseguir unos resultados que, aunque sean aproximados, resulten útiles. El modelo deber ser simple (“el 80% de un sistema se reduce en muchos casos al 20% de sus elementos”), flexible (capaz de incorporar nuevos elementos con cierta facilidad), efectivo (puede alcanzar los objetivos) y eficiente (el tiempo de computación que emplee en alcanzar soluciones sea razonable). La construcción del modelo debe ser progresiva, comenzando por un modelo simple para ir aumentando su complejidad poco a poco. En ningún caso el resultado final debe ser un modelo tan complejo que sea computacionalmente ineficiente.

Para construir el modelo, inicialmente se especifican las variables del modelo. Las variables de un modelo se dividen en exógenas o de entrada, que son externas al modelo y existen independientes del modelo, y endógenas o de salida, que son propias del modelo y dependen de la estructura del mismo y de las variables exógenas. Las variables exógenas se pueden dividir a su vez en controlables o de decisión e incontrolables o parámetros del modelo. En el ejemplo de la entidad bancaria, variables exógenas controlables serían el número de cajeros abiertos para atender a los clientes en cada instante y el número de empleados, mientras que variables exógenas incontrolables serían el número máximo de cajas disponibles, los tiempos entre llegadas de los clientes o los tiempos de atención a los clientes. Algunas variables endógenas serían el número de clientes esperando o el tiempo de ocupación de los empleados. Además de definir las variables del modelo, hay que definir el conjunto de restricciones

sobre las variables del mismo. Por ejemplo, el número de cajeros abiertos no puede exceder al número máximo de se han de identificar las funciones objetivos y las variables que miden las mismas. Por ejemplo, un objetivo a alcanzar en nuestro modelo es minimizar los tiempos de espera de los clientes en los cajeros. Sin embargo, esto puede colisionar con el objetivo de maximizar el tiempo de ocupación de los empleados del banco. En estos casos se puede realizar un análisis multiobjetivos o bien ponderar ambos objetivos en una única función.

Los modelos de simulación, como ya se ha comentado, son de tipo lógico y por tanto se han de representar de forma simbólica. Las especiales características de un modelo dinámico de eventos discretos implican que los diagramas de flujo propios de un programa de ordenador no sean apropiados. Para expresar simbólicamente los modelos de simulación de eventos discretos se suelen utilizar dos herramientas: los grafos de eventos y los diagramas de ciclos de actividades. Los primeros utilizan un enfoque basado en sucesos, reflejando los sucesos del sistema, la relación entre los mismos y la actualización de las variables de estado. Mientras que los segundos utilizan un enfoque basado en actividades, mostrando la secuencia de operaciones que realiza cada elemento que interviene en el modelo a su paso por el mismo. Ambas herramientas de modelado se analizarán en detalle más adelante con varias ilustraciones.

4. *Recopilación y preparación de los datos.* Este paso suele producirse simultáneamente con la propia construcción del modelo. No obstante, como la recopilación de los datos necesita un porcentaje bastante grande del tiempo total del proceso de simulación, es necesario comenzar cuanto antes. Los objetivos planteados en la primera etapa marcan en gran medida los tipos de datos que son necesarios recopilar. Por ejemplo, se pueden recoger las distribuciones de los tiempos de esperas en la entidad bancaria a estudiar para varios valores de las variables controlables, de forma que luego permitan validar la simulación. Otros datos se refieren a variables incontrolables como las distribuciones de los tiempos de llegadas o de los tiempos de atención al cliente.

A la hora de utilizar los datos en el modelo, pueden ser considerados como deterministas o estocásticos. En el primer caso, se conocen las distribuciones con certeza. Sin embargo, en el segundo caso, los datos se pueden incluir en el modelo de dos formas: usando la muestra de datos para representar la distribución de probabilidad, o determinar una distribución probabilística teórica que se aproxime bien a la muestra para usarla en el modelo. Hoy en día, los programas de simulación suelen incorporar una aplicación de análisis de datos de entrada como apoyo a los analistas.

5. *Codificación del programa.* La mayoría de los sistemas reales son tan complejos que los modelos requieren una gran cantidad de información y una elevada capacidad de operación. Por este motivo el modelo que se desarrolle debe ser programado en un ordenador. El analista del sistema debe decidir si realiza el programa en un lenguaje de propósito general, FORTRAN, C,

Basic, o utiliza algún lenguaje específico de simulación como Arena. Los primeros son más conocidos y accesibles para los programadores, necesitando en general menos tiempo de ejecución. Sin embargo, un programador de lenguajes de simulación codifica el modelo en menos tiempo que si utiliza lenguajes de propósito general. Además, los lenguajes orientados a la simulación suelen incorporar un conjunto de herramientas que facilita la labor del analista y programador, como por ejemplo un analizador de datos de entrada y de salida o un animador gráfico. Los lenguajes de simulación que llevan integrados estos módulos suelen denominarse herramientas de simulación.

6. *Verificar el programa.* La verificación del programa consiste en comprobar que el programa está libre de errores y de acuerdo al modelo. Esta operación se puede realizar manualmente, gráficamente o mediante un test con soluciones ya conocidas.
7. *Validar el modelo.* La validación del modelo comprueba si el modelo de simulación es una buena aproximación del sistema a estudiar. Se dice que un modelo es válido si sus valores de medida se corresponden con los datos recogidos del sistema real (experimentos de campo). Por ejemplo, en un modelo de colas se comparan los tamaños de las colas generadas por el modelo y los tamaños reales del sistema. El modelo también se puede validar mediante una serie de métodos específicos como el Test de Turing o el Método Delphi.

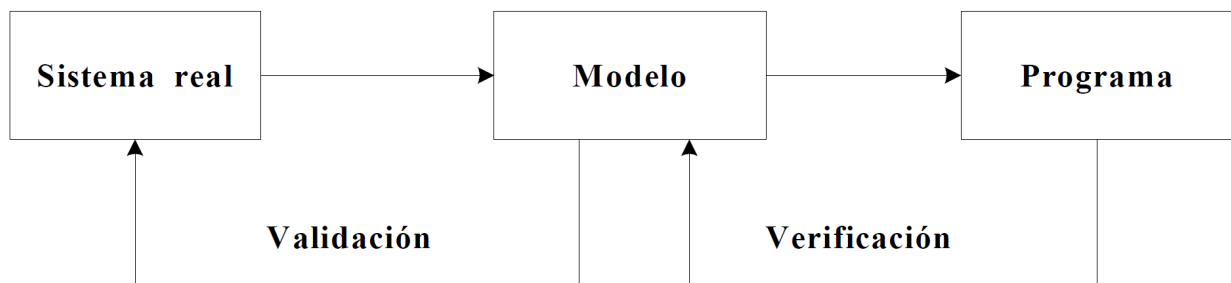


Figura 14 Validación y verificación del modelo

8. *Diseño experimental.* El objetivo en el diseño de los experimentos es fijar los valores de los parámetros y la configuración de la simulación de forma que la información que se desea obtener se realice con el mínimo número de simulaciones posibles. Existen dos enfoques para realizar el diseño de los experimentos:

- Identificar el conjunto de factores que afectan a las variables de salida y ejecutar el experimento con valores concretos de los mismos. Se usan técnicas estadísticas para discernir si los factores seleccionados afectan a las variables de salida. Por ejemplo, en la cola de un supermercado se definen dos factores: el número de cajeros y el porcentaje que dedica cada uno de ellos a llenar las bolsas. Se definen tres niveles para cada factor

y se utilizan como variables de salida la espera de los clientes en las colas y la utilización de los cajeros. Se decide ejecutar nueve veces cada uno de los ocho experimentos y determinar la combinación de factores con menor coste mediante análisis de varianza.

- Buscar la mejor solución para las variables de decisión o factores mediante los experimentos de simulación. Una de estas técnicas consiste en encontrar una función que describa la relación entre las variables de decisión y las variables que miden el comportamiento del sistema. Son métodos iterativos, donde se inicia con un conjunto de valores sobre las variables de decisión que se van modificando mediante métodos de búsqueda locales. En el ejemplo del supermercado, se inician ambos factores con los valores mínimos y se ejecuta la simulación. En las siguientes simulaciones se modifican levemente los valores para buscar la dirección de máximo descenso.

9. *Ejecución de la simulación y análisis de los resultados.* En este paso se obtienen los valores de las variables de salida del modelo y que determinan las prestaciones del sistema que se está simulando. Se aportan una serie de entradas al modelo y se comprueba si lo que se obtiene es lo que realmente se desea o, por el contrario, hay que cambiar las entradas o el modelo mismo. Se produce así un proceso de realimentación.

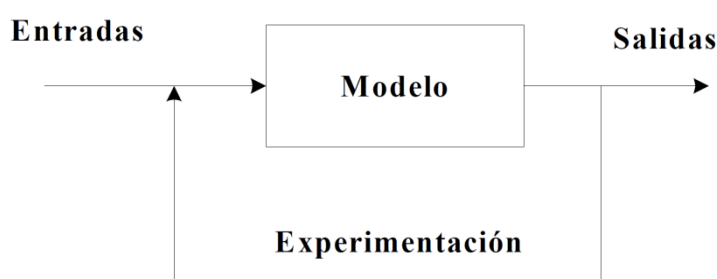


Figura 15 Realimentación del modelo

El análisis de los resultados depende de los objetivos que se estudien y de los factores que definen el problema: si el comportamiento es absoluto o se comparan diferentes sistemas, si el problema es de horizonte finito (transitorio) o en régimen permanente, y si el tamaño de la muestra es fijo o es secuencial. El análisis de resultados se realiza mediante diferentes métodos de estudio de datos (métodos estadísticos clásicos, de comparaciones múltiples, de ordenaciones múltiples, secuenciales, regenerativos,...) que suelen incorporarse en las herramientas de simulación.

10. *¿Más simulaciones?* En función de los resultados de las simulaciones que ya se han completado, el analista decide si son necesarios más experimentos o si, por el contrario, las ya completadas son suficientes.
11. *Documentación del programa y presentación de los resultados.* Habrá que documentar el programa por la posibilidad de que posteriormente vaya a ser utilizado por otros analistas, distintos de los que lo desarrollaron. La presentación de resultados se realizará en función del tipo de problema que se resuelve y de para quién vaya dirigida esta documentación:
- Si el problema es de tipo no recurrente, las decisiones son únicas, el horizonte de tiempo es largo y los resultados deben ser analizados por un grupo reducido de expertos; por ejemplo estudiar la localización de un supermercado en una ciudad.
 - Si el problema es de tipo recurrente, las decisiones son rutinarias, a corto plazo y los resultados se enfocan hacia un grupo mayor de usuarios de nivel medio; por ejemplo los mensajes que se les muestran a los operadores de una fábrica.
12. *Implementación.* El éxito de la fase de implementación depende de lo bien que se realicen las fases anteriores del proyecto. Si el modelo y las suposiciones iniciales son correctos entonces la implementación se realizará con éxito.

Con estas etapas queda completamente definido un proyecto de simulación. Este suele ser el orden de ejecución aunque algunas de ellas pueden ir en paralelo como la formulación del modelo y la recogida de datos, y a veces hay que volver a ejecutar fases anteriores, por ejemplo, si el modelo no es válido se suelen recoger más datos y reconstruir el modelo, o si el programa no se ajusta al modelo se suele modificar dicho programa.

4.2.2 VENTAJAS E INCONVENIENTES.

Aunque la simulación es una herramienta adecuada para el análisis de muchos sistemas, es preciso no obstante considerar previamente las ventajas y desventajas que reporta, a continuación se recogen algunas de las más comunes de ellas.

Las principales ventajas de la simulación son las siguientes:

- Una vez que el modelo está construido, se puede utilizar repetidamente para analizar cambios en el diseño o diversas políticas.
- Suele ser menos costoso obtener datos de un proceso de simulación que de un sistema real.

- Los métodos de simulación son más fáciles de aplicar que los métodos analíticos.
- Los modelos analíticos normalmente requieren asumir muchas simplificaciones para hacerlos matemáticamente tratables. Los modelos de simulación no tienen estas restricciones.
- El entorno en el que se va a incluir el sistema puede ser controlado por el usuario.
- Si se produce algún fallo en el diseño del sistema es más barato corregirlo en un modelo simulado que en un sistema real.

No obstante, la simulación también presenta una serie de inconvenientes:

- Es una técnica imprecisa, por ser aproximada. Se estudia un modelo, no el sistema real.
- Aumentar la precisión implica aumentar la complejidad del modelo. Esto implica un mayor coste de diseño.
- Pueden ser necesarias numerosas ejecuciones de la simulación, lo que implica un mayor coste de operación.
- Los usuarios que están acostumbrados a utilizar la simulación pueden despreciar el uso de técnicas analíticas aun en situaciones en las que estas últimas son apropiadas y suficientes.

La pregunta de un analista es: ¿cuándo usar los modelos analíticos y cuándo los modelos de simulación? En general la simulación se debe usar cuando el modelo no se puede resolver mediante técnicas analíticas, o cuando las hipótesis simplificativas del modelo analítico no reflejan suficientemente el sistema real.

En resumen, la simulación se puede considerar una herramienta muy útil en el análisis de todo tipo de procesos y tareas de diseño y operación de sistemas complejos.

4.3 SIMULACIÓN DE SISTEMAS DINÁMICOS DE EVENTOS DISCRETOS.

En las siguientes subsecciones se describirá qué son los sistemas dinámicos de eventos discretos así como las características de estos y los elementos que los componen según los autores (Eguía. I & Racero. Jesús, 2015).

4.3.1 INTRODUCCIÓN.

En este apartado se van a estudiar las características asociadas a la simulación de sistemas de eventos discretos. Esta técnica es una de la más utilizada dentro del campo de la investigación operativa para el análisis de sistemas complejos, donde la aplicación de otras técnicas de carácter analítico resulta poco eficiente y a veces sin posibilidad de alcanzar soluciones. El análisis experimental de una simulación obliga a la construcción de un modelo que debe ser un reflejo del sistema a estudiar. A partir de dicho modelo, se construye un programa de ordenador, donde se incorpora la información que se disponga del sistema. Tanto el modelo como el programa deben ser validados y verificados mediante diversos test experimentales. Finalmente, se diseñan los experimentos y se analizan los resultados de los mismos.

4.3.2 CARACTERÍSTICAS.

Como ya se ha comentado, los sistemas más estudiados mediante simulación son los sistemas dinámicos de eventos discretos. Estos sistemas se caracterizan porque las variables de estado, que definen el estado del sistema en cada momento, van cambiando únicamente en un conjunto discreto de instantes de tiempo. Por ejemplo, en una entidad bancaria con un único cajero, los clientes llegan cada cierto intervalo de tiempo, aumentando la cola en una unidad justo cuando llega el cliente; cuando el cajero comienza a atender al cliente, en ese instante el número de clientes en la cola disminuye en una unidad y el cajero pasa a estar ocupado; y finalmente, cuando el cajero termina de atender a un cliente, en ese momento pasa a estar desocupado y si existe un cliente en la cola vuelve a atender a otro cliente. Es decir, se definen tres sucesos o eventos (llegada de un cliente, inicio de atención de un cliente y fin de atención de un cliente) que hacen modificar las dos variables de estado del modelo (número de clientes en la cola y estado del cajero) en ciertos instantes de tiempos, pero entre un suceso y otro el estado del sistema no varía.

Para simular este tipo de sistemas se van a utilizar métodos numéricos más que analíticos. Los métodos analíticos son los que resuelven los modelos a partir del empleo de razonamientos matemáticos. Los métodos numéricos, por su parte, utilizan procedimientos informáticos para resolver los problemas matemáticos. En el caso de simulación de modelos con métodos numéricos, estos modelos son ejecutados en vez de solucionados. Se trata de realizar una historia artificial del sistema a partir de las suposiciones del modelo para que, de esta forma, las observaciones obtenidas sirvan para comprobar el correcto funcionamiento de dicho sistema. Se procura que las operaciones individuales (llegadas, servicios,...) ocurran exactamente como en el sistema real. Los movimientos, interacciones y cambios sobre el sistema se producirán en el instante y orden programado. De esta forma se fuerza al modelo a actuar como la realidad.

Este comportamiento discreto del sistema permite la implementación del mismo en un programa de ordenador mediante una lista de sucesos futuros, un reloj que salte en el tiempo hacia el siguiente suceso y unos acumuladores estadísticos que actualicen las variables de estado y las variables de salida que miden el comportamiento del sistema. Estos componentes propios de una simulación de eventos discretos pueden ser programados utilizando lenguajes de propósito general (C, FORTRAN, Basic, Java), o bien utilizar los denominados lenguajes de simulación (SIMAN, GPSS, SIMSCRIPT), que incorporan el módulo de control de sucesos para que el usuario se limite a reproducir las operaciones que realizan las entidades que intervienen en el modelo, con el consiguiente ahorro de codificación.

4.3.3 ELEMENTOS DE UN MODELO DE SIMULACIÓN DISCRETA.

Los elementos más habituales de un modelo de simulación de eventos discretos son los siguientes:

- *Entidades:* son los componentes del sistema, p.ej., máquinas, transportadores, piezas,... Suelen ser de dos tipos: permanentes, son las que están en el sistema durante toda la simulación (p.ej., máquinas), y temporales, son las que entran y salen del sistema (p.ej., trabajos).
- *Actividades:* son aquellas funciones que hacen las entidades o se realizan sobre ellas. En cada actividad se dan cita normalmente dos o más entidades durante un cierto periodo de tiempo (p.ej., el trabajo 1 se procesa en la máquina B durante 8 horas). Cuando comienza una actividad se conoce cuándo va a terminar (de forma empírica o estocástica).
- *Sucesos o eventos:* son los hechos que ocurren en un instante de tiempo y que dan lugar a cambios en el estado del sistema (p.ej., el inicio de una actividad). Durante una actividad se considera que el estado de una entidad se mantiene constante. Los sucesos se pueden clasificar en endógenos cuando ocurren por condiciones en el modelo (p.ej., finalización de una

operación) y exógenos cuando ocurren por causas externas al modelo (p.ej., llegada de un trabajo al sistema).

- *Colas:* son estados pasivos de una entidad mientras espera el inicio de una actividad (p.ej., los trabajos esperan en una cola delante de una máquina que está procesando el trabajo anterior, o las máquinas esperan la llegada de trabajos para comenzar una operación). Aunque físicamente las máquinas no se sitúan en una cola, conceptualmente es válido la espera de máquinas en colas.
- *Atributos:* son características propias de las entidades (p.ej., tipo de máquina, número de la operación de un trabajo). Sirven para distinguir un grupo de actividades de otro, y para la selección de una cierta entidad en una cola con varias de ellas.
- *Conjuntos o Sets:* es un concepto general en simulación asociado a grupos de entidades o de colas (p.ej., la lista de herramientas disponibles en el sistema o la lista de herramientas necesarias para una operación en una máquina).
- *Estados:* son las condiciones del modelo o de sus entidades, de forma que se puede saber si una acción se puede ejecutar o si se puede elegir entre varias (p.ej., una entidad puede estar en estado activo -ocupada en una actividad- o en estado pasivo -esperando en cola).

4.4 ARENA.

ARENA es un software de simulación de sistemas dinámicos de eventos discretos propiedad de la compañía Rockwell Automation. El programa utiliza el lenguaje SIMAN el cual es un lenguaje de simulación de propósito general, muchas de sus características especiales lo distinguen de sus rivales ya que SIMAN está fuertemente orientado hacia la simulación de fabricación. Con posterioridad se añadió al desarrollo de SIMAN una función de animación denominada Cinema. La animación fue, y sigue siendo en la ARENA, una representación gráfica sencilla de la simulación de este modo, por ejemplo, la velocidad relativa del movimiento de los iconos en la pantalla no es un reflejo de la velocidad relativa de las entidades incluidas en el modelo. Para superar los problemas de una sintaxis poco clara se añadieron dos simples herramientas gráficas de construcción de modelos, Bloques y Elementos. Las dos herramientas han sido muy mejoradas e incorporadas en ARENA.

4.4.1 MÓDULOS BÁSICOS.

A continuación explicaremos algunos de los módulos básicos de ARENA.

CREATE: Este módulo está pensado como el punto de partida para las entidades en un modelo de simulación. Las entidades se crean utilizando un horario o en base a un tiempo entre llegadas. Entidades entonces dejan el módulo para comenzar el procesamiento a través del sistema. El tipo de entidad se especifica en este módulo.

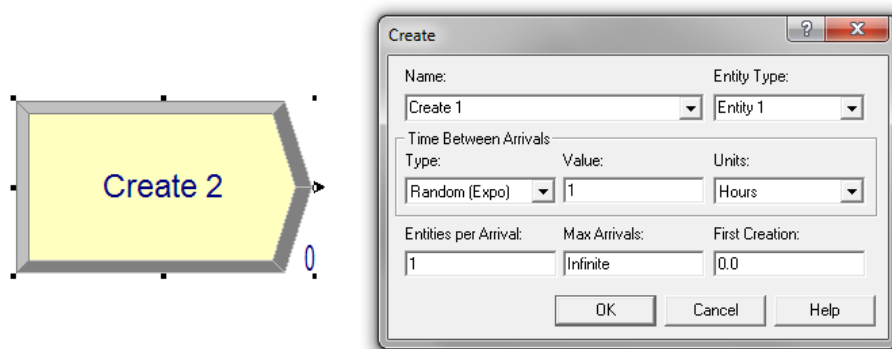


Figura 16 Módulo Create

ASSIGN: Este módulo se utiliza para asignar nuevos valores a las variables, atributos de entidad, tipos de entidad, entidad de imagen, u otras variables del sistema. Desde un mismo módulo assign se pueden hacer múltiples asignaciones.

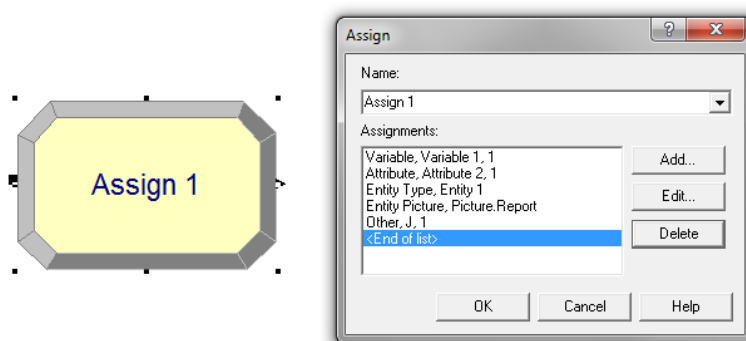


Figura 17 Módulo assign

PROCESS: Este módulo está pensado como el módulo principal de procesamiento en la simulación. En el módulo están las opciones para la captación y la liberación de las restricciones de los recursos. Además, existe la opción de utilizar un "submodelo" y una lógica jerárquica específica definida por el usuario. También se asigna el tiempo de proceso de la entidad y puede ser considerado como un valor añadido, sin valor agregado, transfer, de espera u otro. El costo asociado se añadirá a la categoría correspondiente.

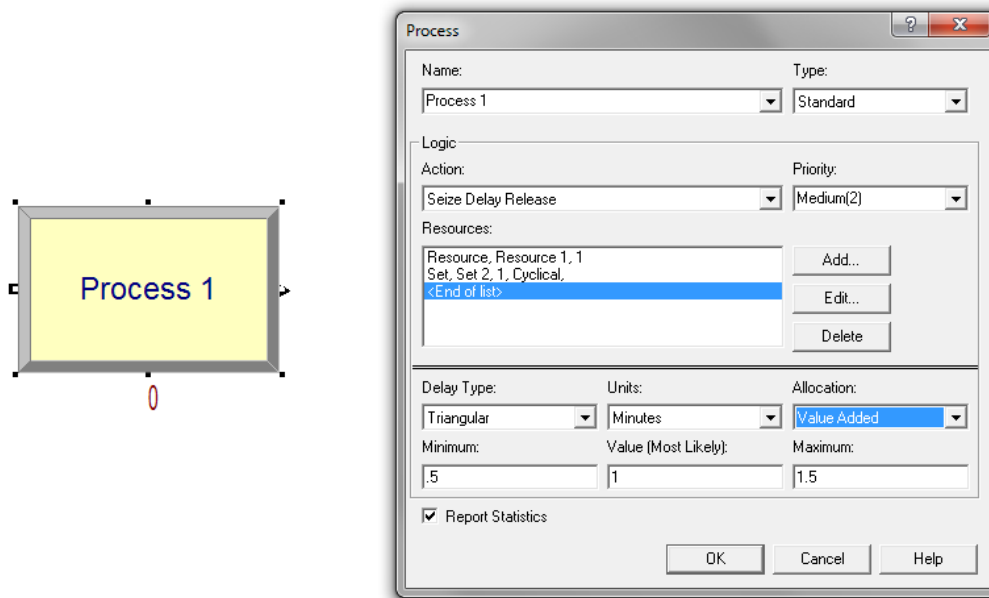


Figura 18 Módulo Process

DECIDE: Este módulo permite la toma de decisiones en el sistema. Cuenta con opciones para tomar decisiones basadas en una o más condiciones (por ejemplo, el tipo de entidad) o en base a una o más probabilidades (por ejemplo, 75% verdaderos; 25% falsos). Las condiciones pueden basarse en valores de atributo (por ejemplo, prioridad), valores de las variables (por ejemplo, Número denegado), el tipo de entidad, o una expresión (por ejemplo, NQ (ProcessA.Queue), nº de piezas en cola del proceso A).

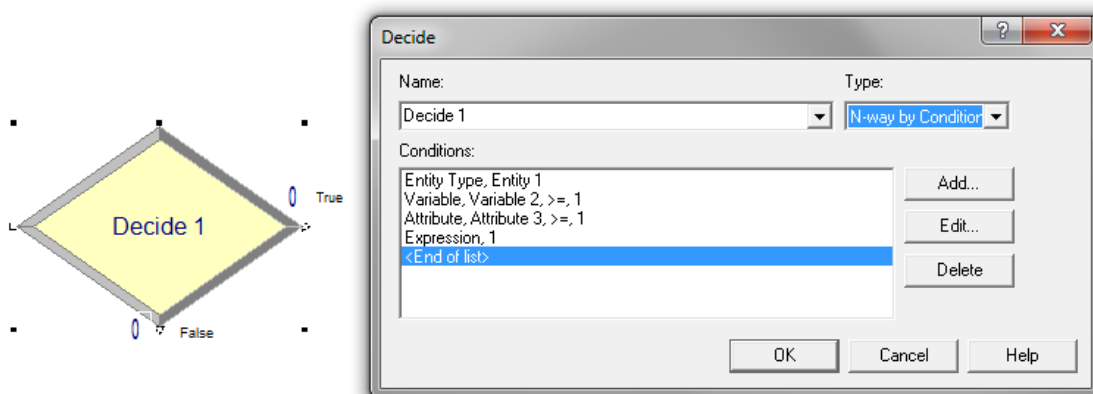


Figura 19 Módulo Decide

BATCH: Este módulo está pensado como el mecanismo de agrupación en el modelo de simulación. Los lotes de entidades pueden ser permanente o temporalmente agrupados. Estos lotes temporales más tarde podrán ser fraccionados utilizando el módulo Separate. Los lotes se pueden hacer especificando cualquier número de entidades que entran o pueden combinarse juntos en base a un atributo. Las entidades que llegan al módulo se colocan en una cola hasta que el número requerido de entidades se ha acumulado. Una vez acumulados, se crea una nueva entidad representativa.

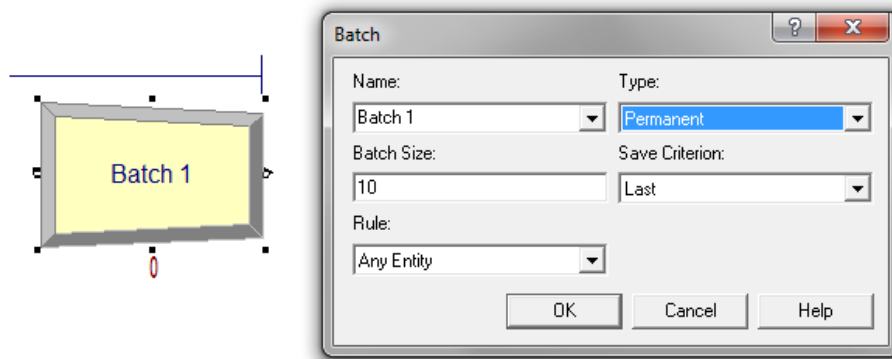


Figura 20 Módulo Batch

SEPARATE: Este módulo puede ser utilizado para copiar una entidad entrante en múltiples entidades o para dividir una entidad lote proveniente de un batch. También se especifican las reglas para la asignación de los costes y de los tiempos de los duplicados y normas para la asignación de atributos a las entidades. Al dividir los lotes existentes, la entidad representativa temporal que se entró se aparta pudiéndose eliminar posteriormente y las entidades nuevas que formaban el lote se recuperan. Las entidades proceden secuencialmente desde el módulo en el mismo orden en el que originalmente se añadieron al lote.

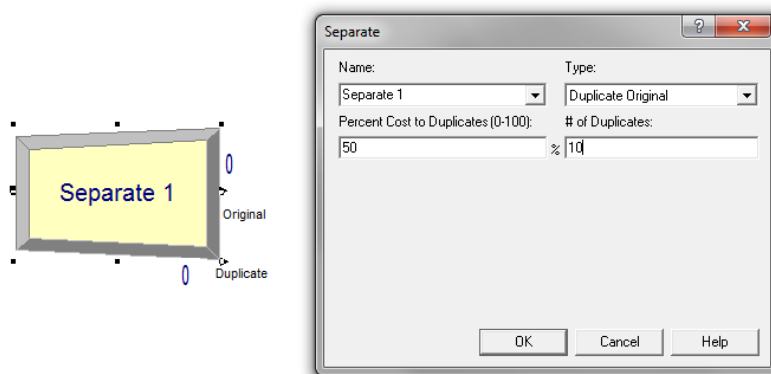


Figura 21 Módulo Separate

RECORD: Este módulo se utiliza para recopilar estadísticas del modelo. Están disponibles varios tipos de estadísticas de observación, incluyendo el tiempo entre las salidas a través del módulo, las estadísticas de la entidad (tiempo, costes, etc.), las observaciones generales, y las estadísticas de intervalo (de alguna marca de tiempo para el tiempo de simulación actual).

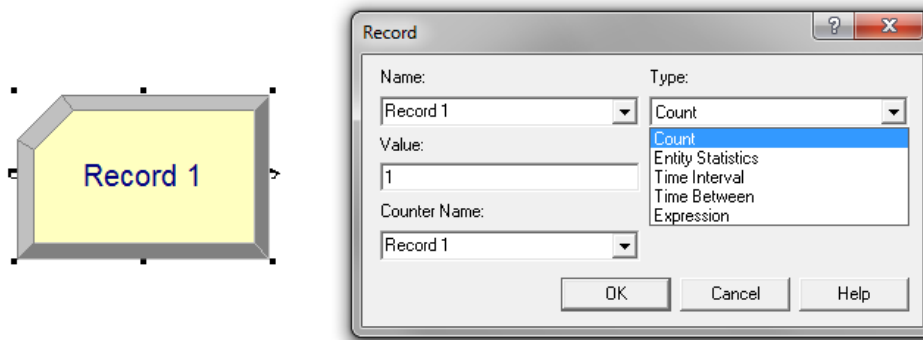


Figura 22 Módulo Record

DISPOSE: Este módulo pretende ser el punto final para las entidades en un modelo de simulación. Se pueden registrar las estadísticas de la entidad antes de que salga del sistema.

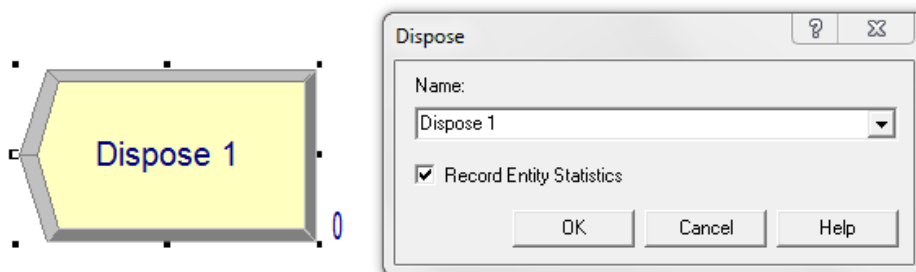


Figura 23 Módulo Dispose

4.4.2 MÓDULOS AVANZADOS.

A continuación explicaremos algunos de los módulos avanzados de ARENA.

HOLD: En este módulo se almacenarán entidades en una cola esperando: a una señal, o a que una condición especificada sea verdadera (scan) o ser almacenada infinitamente (para luego ser eliminado con el módulo de Remove). Si la entidad está esperando a una señal, el módulo de Signal se utiliza para permitir a la entidad a pasar al siguiente módulo. Si la entidad está esperando a que una condición dada sea verdad, la entidad se mantendrá en el módulo (ya sea en una cola definida o interna) hasta que la condición(s) sea cierta. Cuando la entidad se encuentra en una espera infinita, el módulo Remove se utiliza para permitir a la entidad continuar el procesamiento.

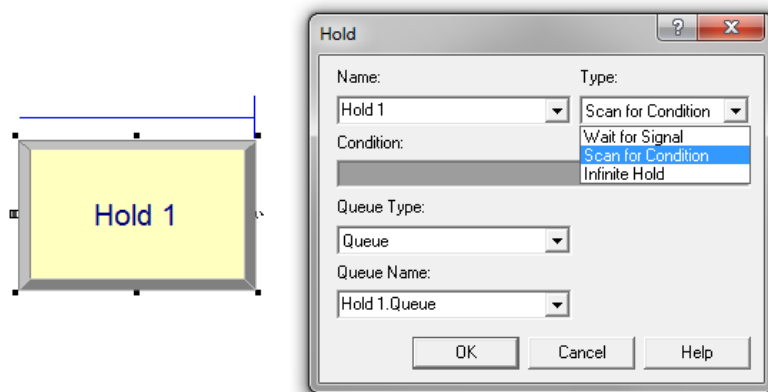


Figura 24 Módulo Hold

SIGNAL: Este módulo envía un valor de señal a cada módulo Hold en el modelo que esperan una señal (Wait for Signal) y libera el máximo número de entidades especificado. Cuando una entidad llega a un módulo Signal, se evalúa la señal y el código de la señal se envía. En este momento, las entidades en los módulos Hold que esperan para la misma señal se retiran de sus colas. La entidad que envía la señal sale del módulo y continúa con una entidad más en el sistema.

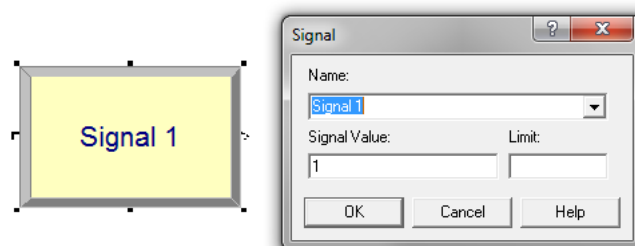


Figura 25 Módulo Signal

MATCH: El módulo reúne a un número determinado de entidades esperando en colas diferentes para agruparlas. El grupo puede realizarse cuando hay al menos una entidad en cada una de las colas. Además, se puede especificar un atributo de manera que las entidades esperando en las colas deban tener los mismos valores de atributo antes de iniciarse el agrupamiento. Cuando una entidad llega al módulo de Match, que se coloca en una de hasta cinco colas posibles, basado en el punto de entrada a la que está conectada. Las entidades permanecerán en sus respectivas colas hasta que se forme un grupo. Una vez que existe un grupo, una entidad de cada cola se libera para ser emparejado.

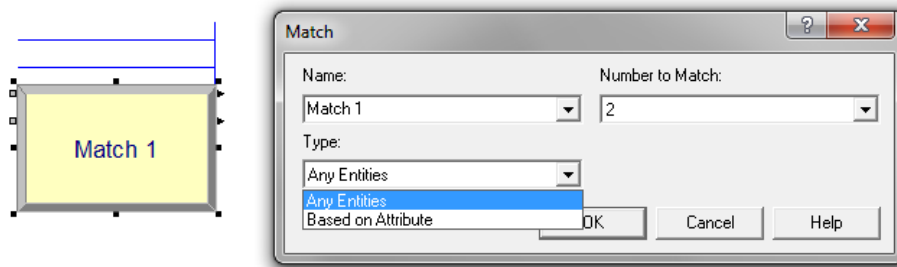


Figura 26 Módulo Match

READWRITE: Este módulo se utiliza para leer datos de un archivo de entrada o del teclado y asignar los valores de los datos a una lista de variables o atributos (u otra expresión). Este módulo también se utiliza para escribir datos en un dispositivo de salida, mostrando en pantalla o escribiendo en un archivo. Al leer o escribir en un archivo, la lógica ReadWrite varía según el tipo de archivo. Cuando una entidad llega al módulo de ReadWrite, el archivo especificado, por ejemplo una tabla Excel, se busca el grupo de valores especificado en ARENA y agrupado bajo un nombre en Excel, entonces ARENA va asignando los valores que encuentra en dicho grupo según se especifique, o como variables o como atributos.

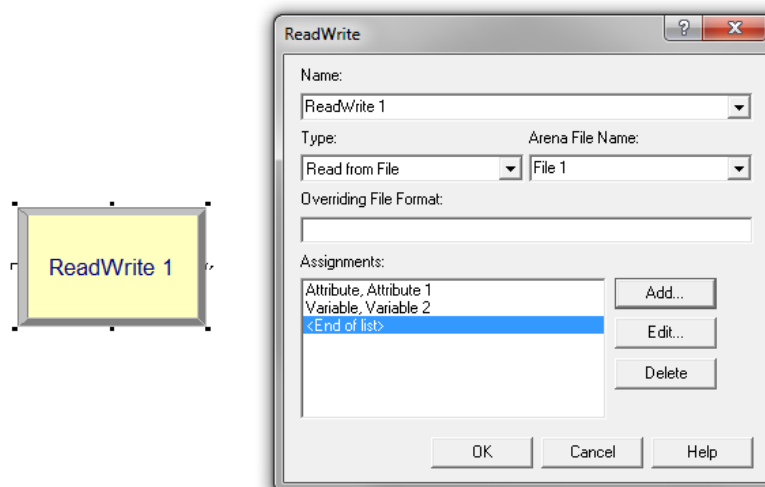


Figura 27 Módulo ReadWrite

4.4.3 ESTACIONES Y SECUENCIAS.

En esta subsección se explicarán cómo se organizan las estaciones y rutas dentro de la simulación en ARENA a través de los módulos de transferencia.

STATION: El módulo de estación define una estación (o un conjunto de estaciones) que corresponde a una localización física o lógica donde se produce el procesado. Si el módulo de la estación define un conjunto de estaciones, hace referencia a una agrupación efectiva de múltiples ubicaciones. La estación (o cada estación dentro del conjunto definido) tiene un área de actividad coincidente que se utiliza para informar de todos los tiempos y los costes acumulados de las entidades en esta estación. El nombre de esta área de actividad es la misma que la estación. Si se define un Parent Activity Area, entonces también se acumula cualquier tiempo y coste de las entidades en esta estación.

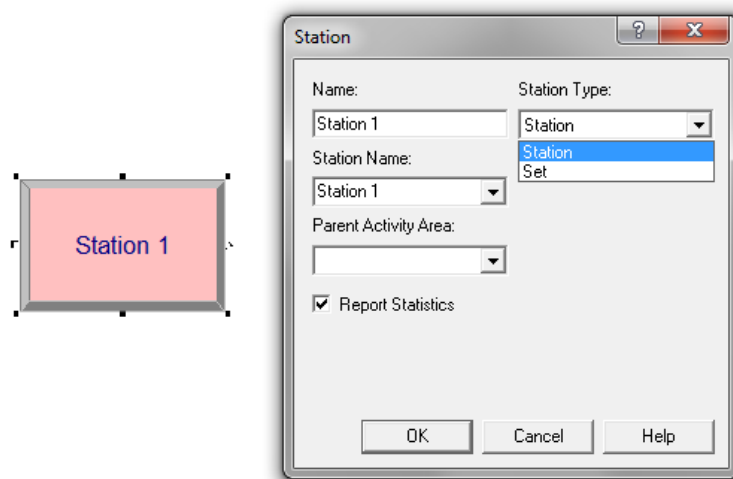


Figura 28 Módulo Station

ROUTE: Este módulo transfiere una entidad hacia una estación especificada, o la próxima estación en la secuencia de estaciones definida para la entidad. Se puede definir un tiempo de espera para transferir a la siguiente estación. Cuando una entidad entra en el módulo, su atributo la estación (Entity.Station) se establece en la estación de destino. La entidad se envía entonces a la estación de destino, utilizando el tiempo de recorrido especificado. Si se introduce el destino de la estación como secuencia, la siguiente estación estará determinada por la secuencia y el paso de la entidad dentro del conjunto (definida por los atributos especiales de carga Entity.Sequence y Entity.Jobstep, respectivamente).

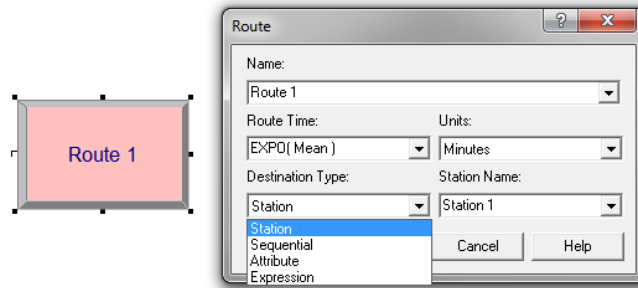


Figura 29 Módulo Route

SEQUENCE: Este módulo se utiliza para definir una secuencia de flujo de entidad a través del modelo. Una secuencia consiste en una lista ordenada de estaciones por las que la entidad debe pasar. Para cada estación en la secuencia, se pueden asignar valores en el módulo de secuencia como atributos y variables, normalmente el tiempo de proceso o el tiempo de Set Up.

Todas las entidades poseen tres atributos especiales. El atributo Sequence (Entity.Sequence) que define la secuencia que una entidad ha de seguir; un valor de 0 indica que la entidad no está siguiendo ninguna secuencia. Para que una entidad siga una secuencia, a su atributo de secuencia se le debe asignar un valor (por ejemplo, con el módulo Assign). El atributo JobStep (Entity.Jobstep) guarda el número de la estación actual en la que se encuentra la entidad en la secuencia. Este valor se actualiza automáticamente cada vez que una entidad se transfiere por la secuencia (por ejemplo, en el módulo Leave). Por lo general, no es necesario asignar un valor a JobStep explícitamente en el modelo. El atributo PlannedStation (Entity.PlannedStation) almacena el número de estación asociado con el siguiente JobStep en la secuencia. Este atributo no es asignable. Se actualiza automáticamente cada vez que cambia Entity.Sequence o Entity.JobStep, o cuando la entidad entra en una estación. Los números de las estaciones JobStep deben ser globalmente únicos.

Sequence - Advanced Transfer

	Name	Steps
1	Sequence 1	2 rows
2	Sequence 2	2 rows
3	Sequence 3	2 rows
4	Sequence 4	2 rows
5	Sequence 5	2 rows
6	Sequence 6	3 rows
7	Sequence 7	2 rows
8	Sequence 8	2 rows
9	Sequence 9	2 rows
10	Sequence 10	2 rows
11	Sequence 11	2 rows
12	Sequence 12	2 rows
13	Sequence 13	2 rows
14	Sequence 14	3 rows
15	Sequence 15	3 rows
16	Sequence 16	3 rows

Steps

	Station Name	Step Name	Next Step	Assignments
1	Estacion 9			2 rows
2	Estacion 6			2 rows
3	Salida			0 rows

Assignments

	Assignment Type	Attribute Name	Value
1	Attribute	Tiempo_proceso	48
2	Attribute	Set_Up	5

Double-click here to add a new row.

Figura 30 Módulo Sequence

5. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.

5.1 INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se va a presentar el problema concreto a abordar que se corresponde con el modelado y simulación de la secuenciación y reducción del tiempo de entrega de pedidos en un taller real de fabricación de electrodos en un horizonte de producción semanal y con una distribución tipo taller job shop.

En primer lugar se va a describir la empresa objeto de estudio, a continuación se describen el producto, los procesos y los recursos que se utilizan para su fabricación.

5.2 DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA.

Fábrica Nacional de Herramientas S.A. (FANDHER®, por sus siglas abreviadas) es una empresa familiar fundada el 12 de Mayo de 1995 en la ciudad de Aguascalientes México.

En sus inicios se dedicó a la fabricación de maquinados para satisfacer las necesidades de grandes empresas nacionales y multinacionales de la industria Ferroviaria, Automotriz y Metal mecánica en general. Dentro de sus principales clientes se encontraban Nissan Mexicana, Xerox Company, Texas Instruments entre otros, así como concesionarios de las vías férreas mexicanas tales como Ferromex, Ferrosur, Alstom, Kansas City Southern.

Inicia sus trabajos en un pequeño taller de 160 m² contando con una plantilla de 4 personas y una maquinaria que en su mayoría había sido adquirida en 1995 como parte de un lote de máquinas convencionales.

Durante muchos años se dedicó a la producción de Buriles Calzados norma ANSI, con la parte operante de Carburo de Tungsteno, productos utilizados para el maquinado de piezas en Tornos. Otra de sus principales líneas se dedicó a la fabricación de Brocas de vía utilizadas para la colocación y el mantenimiento de las vías del ferrocarril.

Desde 1997 FANDHER® inicia la fabricación de Electrodos para Soldadura por resistencia, elaborados a partir de aleaciones de cobre. A partir del 2000 se introduce de manera fuerte en este mercado

haciéndose con contratos para proveer de Electrodo a una gran multinacional. FANDHER® se encuentra actualmente emplazado en lo que antes era una nave dedicada a la producción Textil. En el año 2013 se realizó la compra de dicha nave y se realizaron reformas de acondicionamiento para poder realizar la mudanza desde el antiguo taller.

La nave cuenta con 2000 m² de construcción dividido en 4 grandes áreas: producción, almacén, soporte funcional (ingeniería, calidad) y el área de oficinas.

Se trabaja conjuntamente con otra empresa de la misma familia, llamada Arro de México S.A de C.V, la cual se dedica a la comercialización y distribución de herramientas de corte; y en el caso de FANDHER® es la empresa que lleva la parte comercial, contable y de ciertas operaciones como son las compras de materiales y gestión de aduanas. Esta empresa se encuentra ubicada a 20 Km de distancia aproximadamente en lo que antiguamente eran las oficinas comunes y el taller de producción de FANDHER®.

FANDHER® se encuentra catalogada como Industria pequeña según la clasificación que realiza el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) *“Industria pequeña: Las empresas que ocuparan hasta 100 personas y sus ventas netas no rebasaran la cantidad de 400 millones de pesos al año”. (22 millones euros aproximadamente).*

Actualmente se emplean entre ambas empresas un total de 35 personas de las cuales 23 están dedicadas a FANDHER®.

5.3 DESCRIPCIÓN DEL PRODUCTO.

Actualmente la producción de FANDHER® cuenta con varias líneas, siendo estos tres sus productos principales:

- I. Electrodo.
- II. Buriles Calzados.
- III. Brocas para perforado de vía.

Buriles y Electrodo tienen líneas de producción dedicadas y exclusivas y no comparten maquinaria entre sí, mientras que las brocas para perforado de vía comparten algunas máquinas con la línea de electrodo. Todas las líneas presentan áreas de oportunidad para mejora, sin embargo, para efectos de este trabajo nos centraremos en la línea de Electrodo, ya que hoy en día es la línea de producción más importante y

con mayores miras de crecimiento. Dentro de la línea de electrodos se tienen más de 800 referencias vigentes diferentes.

5.3.1 ELECTRODOS.

Dentro de la soldadura, un electrodo es una varilla metálica, de composición aproximada a la del metal a soldar y recubierta con una sustancia que recibe el nombre de revestimiento. Cuando se establece una corriente a través del circuito de soldadura, salta un arco eléctrico entre el extremo del electrodo y la pieza, este arco provoca una fusión del electrodo y del metal base. El metal fundido cae en el cráter originado por la fusión del metal base y se forma un baño de fusión (Giachino & Weeks, 1981).



Figura 31 Ejemplo de electrodos para la Soldadura por Resistencia

En términos generales esa es la función de los electrodos en el mundo de la soldadura, sin embargo los Electrodo fabricados por FANDHER® son usados para la Soldadura por Resistencia SIN aporte de material, que es uno de los muchos métodos usados para unir dos o más piezas de metal. Algunos de estos métodos son nombrados a continuación con el propósito de demostrar cómo la soldadura por resistencia se diferencia de ellos:

- I. Atornillado
- II. Remachado
- III. Soldadura de plata

- IV. Soldadura de arco
- V. Soldadura por resistencia



Figura 32 Ejemplos de otras geometrías de electrodos

El Atornillado, Remachado y Soldadura de Arco requieren que se les añada un material de aporte al metal que está siendo soldado. Además, el atornillado y remachado requieren que se abran agujeros al metal para que los tornillos puedan entrar. La Soldadura por Resistencia no requiere de ningún material adicional o agujeros en el Metal.

Estos electrodos son fabricados con materiales de la más alta calidad en las siguientes aleaciones:

- I. *Aleación cobre clase II (Cobre Cromo)*
- II. *Aleación clase III (Cobre-Berilio con Níquel o plata)*
- III. *Aleación clase IV = (Cobre Berilio)*
- IV. *Aleación Clase 10(Cobre Tungsteno)*
- V. *Clase 11(cobre Tungsteno)*
- VI. *Clase 12(Cobre Tungsteno)*
- VII. *Clase 13(Tungsteno)*
- VIII. *Clase 14(Molibdeno)*
- IX. *Custom made: materiales especiales, (v.gr.: H13)*

Existen diversas aplicaciones de los electrodos dentro de industria y una gran cantidad de productos distintos que se sueldan a través del uso de los Electrodos. Los electrodos fabricados por FANDHER® se utilizan entre otras cosas para la soldadura de:

- I. Soldadura de tarjetas electrónicas.
- II. Llantas de automóviles (en México llamadas Rines).
- III. Soldadura de lámina de carrocería de vehículos.

5.4 SITUACIÓN ACTUAL DE LA LÍNEA DE PRODUCCIÓN.

5.4.1 INTRODUCCIÓN.

Como se mencionó anteriormente, en sus inicios FANDHER® se encontró ubicada en un pequeño taller de producción de 160 m². Al ser un espacio tan pequeño impedía que se pudiera pensar en una reconfiguración del layout, y por la disposición de las máquinas, el material realizaba muchos recorridos de un lugar a otro, los almacenes de materiales y herramientas estaban distribuidos en espacios que no eran convenientes para su acceso y muchas veces había interferencias entre el propio personal. Diferentes medidas se adoptaron y conforme se adquirieron máquinas más modernas se les apartó del resto dentro de habitaciones separadas, puesto que requerían ciertas condiciones de espacio y clima que no se lograban en el taller, lo que hizo que los movimientos que de por sí había, se hicieran todavía mayores.

En el año 2014 se realizó la compra de una nueva nave industrial de 2000 m² a la cual se trasladaron todas las máquinas y el personal que se encontraba en el antiguo taller, para pasar a parecer más una fábrica que un taller.

Si bien este trabajo no pretende optimizar nada referente a la configuración del layout, se consideró oportuno mencionar esta condición para que se entienda la historia de la Empresa y su evolución hasta su situación actual.

A continuación se describirá la manera en la que está configurada la línea de producción de Electrodos dentro de este nuevo entorno de fabricación.

5.4.2 CONFIGURACIÓN DE LA LÍNEA DE PRODUCCIÓN.

Nuestro escenario de partida es la línea de producción de electrodos, cuyos recursos son los siguientes:

5.4.2.1 MAQUINARIA.

Existen 9 máquinas dentro de la línea distribuidas en forma paralela; esta distribución se planeó originalmente al momento de realizar el cambio de planta con el fin de reducir las distancias recorridas por personal y materiales entre una estación de trabajo y otra. Cada una de estas máquinas trabaja como si fuera un centro de trabajo propio.

Las máquinas con las que se cuentan son las siguientes:

- 1) HAAS: Centro de maquinado de 4 ejes de movimiento y almacén con capacidad de 10 herramientas.
- 2) Chevalier FCL 820: Centro de maquinado de 5 ejes de movimiento y almacén con capacidad de 10 herramientas.
- 3) Fresadora PROTOTRACK SNX CNC: Fresadora con 3 ejes de movimiento, Control Numérico Computarizado.
- 4) Torno PROTOTRACK SNX CNC: Torno con 2 ejes de movimiento, Control Numérico Computarizado (CNC).
- 5) Fresadora SATURNO I: Fresadora con 2 ejes de movimiento, de tipo manual.
- 6) Fresadora SATURNO II: Fresadora con 2 ejes de movimiento, de Control Numérico Computarizado.
- 7) Torno Haringer (de boquillas): Torno con 2 ejes de movimiento.
- 8) Torno McLane: Torno con 2 ejes de movimiento.
- 9) Rectificadora B&S: Bastidor que contiene una muela giratoria compuesta de granos abrasivos duros y resistentes al desgaste y la rotura utilizada para el mecanizado por abrasión.

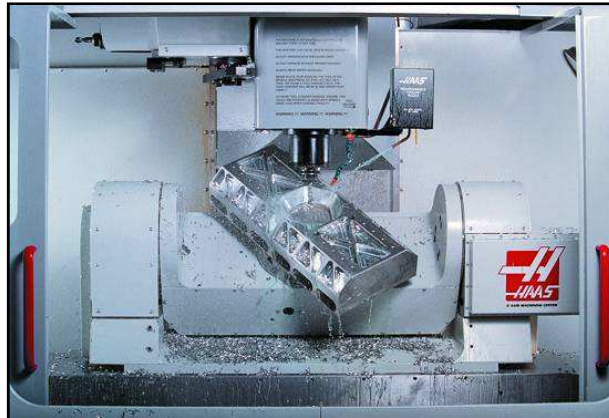


Figura 33 Ejemplo maquinaria. Centro HAAS

5.4.2.2 LAYOUT.

Dentro de la fábrica, la zona que se ocupa de los electrodos se encuentra en esta ilustración recuadrada.

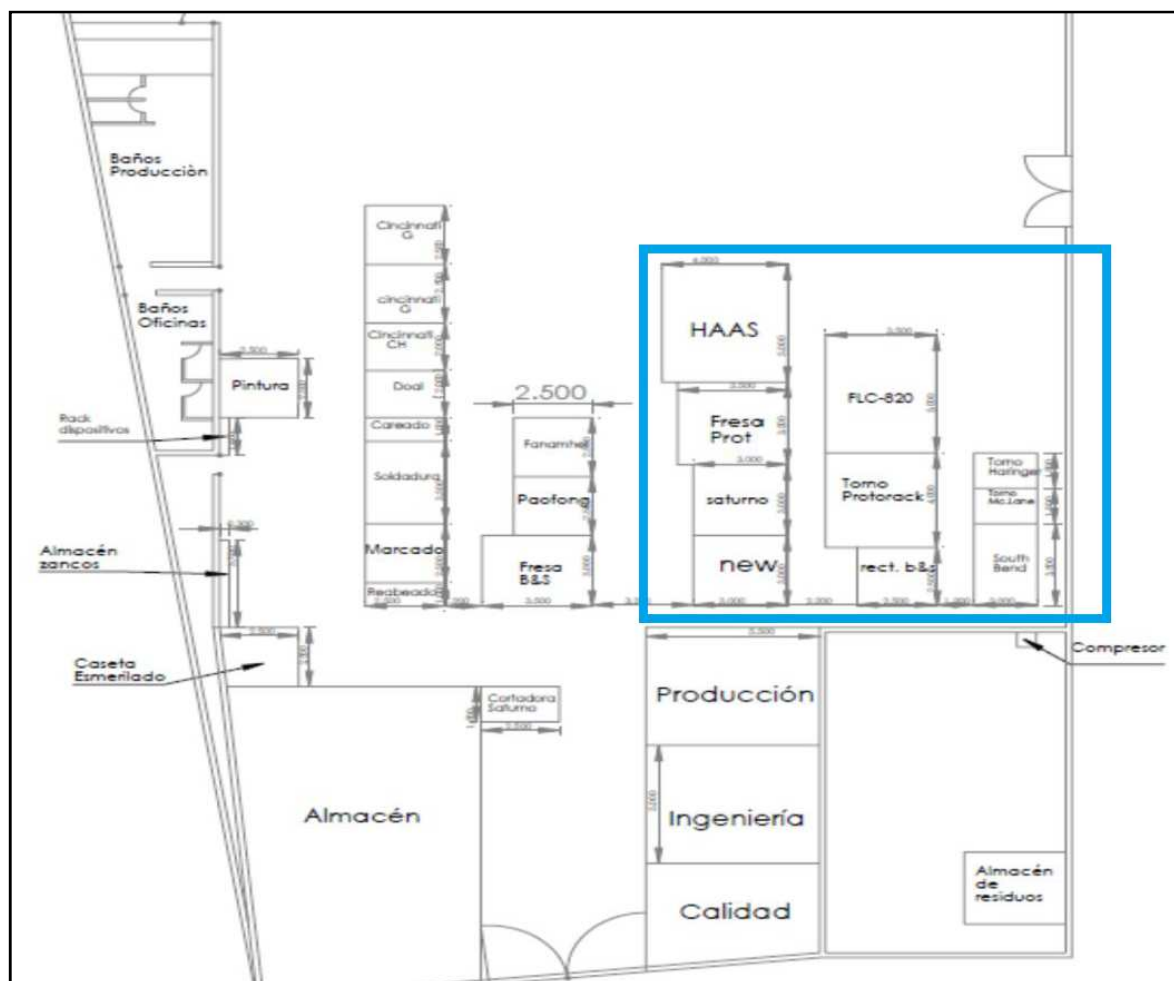


Figura 34 Configuración layout de la empresa

5.4.2.3 PERSONAL.

Actualmente se cuenta con una plantilla de 10 personas (dentro de esta área) encargadas de la producción, 9 de ellos son únicamente operadores de las máquinas y 1 como operador y responsable de la línea. Dado que las distancias entre las máquinas es muy corta, son los mismos operarios los que al término de cada pieza o lote, los transfieren a la estación siguiente según sea el caso.

El personal que opera en esta línea de producción por lo general se dedica al trabajo de un tipo de máquina específico. A pesar de varios intentos por formarlos en la operación de diferentes máquinas, por diversos motivos, que no se tratarán en este trabajo, no ha sido posible generar la multi-habilidad de los operarios, lo cual supone una reducción en la flexibilidad de la línea, puesto que es dependiente de cada una de las personas.

5.4.3 PROCESO DE FABRICACIÓN.

Todos los electrodos se fabrican siguiendo un proceso general similar. Existen diferencias entre algunos de ellos, pero para efectos de este trabajo se considerará como igual.

A continuación se describe la forma en la que actualmente se programa la producción a partir de la recepción de un pedido.

- I. El cliente envía una orden de compra por medio de un correo electrónico en donde especifica el código del producto solicitado y la cantidad de piezas que necesita. En la figura siguiente se puede observar un ejemplo de cómo se recibe. Dependiendo del cliente, se introduce una fecha exacta de entrega del producto, de lo contrario es la propia fábrica la que estima una fecha de entrega.
- II. Se realiza el BOM (Bill Of Materials, es la lista de materias primas, ensambles intermedios, partes y cantidades necesarias para fabricar una unidad de producto final), para cotejar contra existencias en los almacenes de la fábrica y saber si es suficiente para cubrir la demanda o si es necesario solicitar más material. El almacén realiza un requerimiento de piezas y genera un archivo llamado “Órdenes de trabajo” e imprime una hoja con las especificaciones del trabajo, como muestra la siguiente figura.

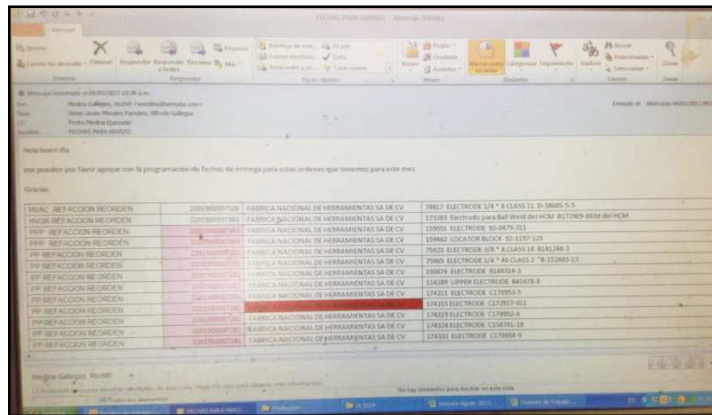


Figura 35 Recepción de órdenes de pedidos de los clientes

 FANDHER® FABRICA NACIONAL DE HERRAMIENTAS S.A. DE C.V. CARATULA DE ORDENES A FABRICAR											
PO	ORDEN DE TRABAJO	FECHA PEDIDO	FECHA PROMESA	MÁXIMO	CANT	DESCRIPCIÓN	CLASE MATERIAL	MEDIDAS DEL MATERIAL	LONG DEL ELECTRODO	BARRAS A PEDIR	1e Cant.
PO 2201900007281	21915	25/02/2015	18/03/2015	75023	16	B141248-3	3	5/8 Ø	0.625	1	
							14	3/8 Ø	1.000	0	
PO 2201900007281	21916	25/02/2015	18/03/2015	75065	1	B152483-13	2	1/4 Ø	2.625	1	
PO 2201900007281	21917	25/02/2015	18/03/2015	100676	51	B144314-3	2	3/4 Ø	0.250	1	
PO 2201900007281	21918	25/02/2015	18/03/2015	114389	4	B41678-8	11	1/4 Ø	2.125	2	
PO 2201900007281	21919	25/02/2015	18/03/2015	174311	3	C170953-5	2	1/2 Ø	3.125	1	
							11	3/8 Ø	1.255	0	
PO 2201900007281	21920	25/02/2015	18/03/2015	174315	3	C172917-011	2	1/2 Ø	2.875	1	
PO 2201900007281	21921	25/02/2015	18/03/2015	174319	3	B170952-6	2	1/2 Ø	3.125	1	
							14	3/8 Ø	1.260	0	
PO 2201900007281	21922	25/02/2015	18/03/2015	174324	3	B158701-18	2	1/2 Ø	3.125	1	

Figura 36 Ejemplo de orden de trabajo a fabricar

- III. Una vez emitido el archivo “Órdenes de trabajo” se divide el trabajo a diferentes áreas: Calidad, Producción y almacén. El área de calidad deberá realizar la trazabilidad del pedido y programar el muestreo aleatorio de piezas. Almacén preparará los elementos necesarios para enviar los productos una vez terminados. Producción realizará la programación de la producción y la generación de fechas de entrega.
- IV. Una vez cuantificado el material, se toman los planos de los electrodos y se crea una “Hoja viajera” que contendrá toda la información del lote de productos del mismo tipo que han de fabricarse: Código del producto, fecha del pedido, fecha promesa de entrega, cantidad del pedido, tipo de material, operaciones necesarias en el producto, se muestra un ejemplo en la

figura siguiente. El dibujo/plano del electrodo así como su hoja viajera son entregados al responsable de la línea para que realice la distribución de la carga.

FANDHER® FABRICA NACIONAL DE HERRAMIENTAS S.A. DE C.V.		HOJA VIAJERA																		
Descripción:		EH3																		
Nº Máx.:	74807	Fecha de pedido:	07/11/2014		Cantidad de Pedido:	8														
O.T.:	21598	Fecha promesa:	28/11/2014		Clase de material:	3														
Cliete:	Sensata Technologies				Medida del material:	1/4 x 3/8														
Operación	Medida	Simbolo	Área/M da	1er Entrega				2do Entrega				3ro Entrega								
				Cant.	Fecha	Responsab.	RW	Cant.	Fecha	Responsab.	RW	Cant.	Fecha	Responsab.	RW	1	2	3	4	
1. Corte	3.125	O																		
2. Carear	Limpiar	O																		
3. Longitud	3.000	O																		
4. Espesor	0.165+/-0.003	O																		
5. Ancho	0.375"	O																		
6. Barr Pasado	0.133"	O																		
7. Barr Mach D	TAP 8-32	O																		
8. Chafalón	19°	O																		
9. Marcado		O	P																	
10. Pulido		O	P																	
11. Lavado		O	L																	
12. Insp. Final		O	C																	
13. Empacado		O	C																	
Entrega de Producto Terminado de PRODUCCIÓN a CALIDAD																				
1er Entrega				2da Entrega				3ro Entrega												
Cantidad	Fecha	Responsable		Cant.	Fecha	Responsable		Cant.	Fecha	Responsable										
Entrega de Producto Terminado de CALIDAD a ALMACEN																				
1er Entrega				2da Entrega				3ro Entrega												
Cantidad	Fecha	Responsable		Cant.	Fecha	Responsable		Cant.	Fecha	Responsable										
Recibo de Producto Terminado (Almacén)																				
1er Entrega				2da Entrega				3ro Entrega												
Cantidad	Fecha	Responsable		Cant.	Fecha	Responsable		Cant.	Fecha	Responsable										
Cantidad total																				
Firma de																				

NOTAS PARA EL MUESTREO:

1.- Si fabrica de 1 pieza a 15 piezas el proceso.

2.- De 16 piezas a 25 piezas, mue el proceso.

3.- De 26 piezas en adelante, mue el proceso.

3.- La primera pieza siempre se le primer espacio del muestreo.

SIMBOLOGÍA

Transporte	→	F.CNC.
Operación	○	T.CNC.
Inspección	□	RECT.
Almacén	▽	L
Demora	D	S.
Op. Con Insp.	□	C.
Rev. Referenciada al plano		Pris.
		A.S.

Figura 37 Ejemplo de hoja viajera que acompaña al lote

V. El responsable de la línea distribuye la carga de producción a las diferentes máquinas, basándose en su experiencia. Esta asignación la realiza porque conoce en que máquina se produce cada electrodo, así como las capacidades que tiene cada uno de sus operarios. Dado que existen máquinas similares puede optar por asignarlo a una u otra dependiendo del operador que esté.

VI. Una vez fabricado todo el pedido este se envía al almacén para que proceda con el empaquetado del toda la orden y su posterior envío.

Este es el procedimiento que sigue cada Electrodo para ser fabricado descrito de manera muy general, varía entre cada uno el tipo de operaciones, máquinas materiales y herramientas que se utilizan, algunos de ellos incluso siguen un procedimiento diferente al antes descrito, puesto que son considerados “especiales” ya sea por el cliente al que van destinado o si estos utilizan materia prima delicada y de alto costo o por el tamaño del Producto Terminado.

5.5 DESCRIPCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA.

FANDHER® es una PyME manufacturera de grado 2 (Tier 2, empresas que suministran piezas a empresas de Tier 1, las cuales atienden directamente a las empresas automotrices), puesto que suministra herramientas maquinadas a empresas de mayor tamaño las cuales suelen fabricar sub-ensambles con dichos maquinados y surtir así a las fábricas automotrices.

Cada una de las empresas a las cuales FANDHER® fabrica, realiza sus pedidos de manera distinta y en diferentes periodos de tiempo. Algunas de estas empresas disponen de su programa mensual de producción, el cual hacen llegar a FANDHER® al final de cada mes. Esto hace posible que se realice la planificación de materiales y que se elabore el plan de producción. Sin embargo existen otras empresas que no proveen esta información con ningún tipo de anticipación, suelen enviar sus requisitos de producción junto con una fecha esperada de entrega. El canal de entrada de información es el mismo, esto es, siempre es el mismo departamento el que recibe la solicitud, sin embargo, la manera en la que se recibe la información es diferente por parte de cada cliente y en ocasiones el mismo cliente realiza sus solicitudes siguiendo un formato diferente. Todo esto obliga a que la información se vuelva a procesar para dejarla en el lenguaje de la empresa.

Las partidas suelen estar conformadas por un gran volumen de órdenes de trabajo diferentes, cada una con un volumen de producción que puede variar desde 1 sola pieza a fabricar hasta 300 piezas (por ejemplo). Los tiempos de fabricación de los electrodos son muy variados, desde piezas que requieren tan solo unos pocos minutos de fabricación, hasta piezas que rondan 1 hora de fabricación o más. Los clientes suelen dar su propia prioridad a los productos que solicitan, de modo que una vez recibidas todas las partidas, se tiene que asignar prioridades que combinen las de los clientes, de modo que se intente satisfacer la demanda de todos.

El tener muchas órdenes, pocas piezas, diferentes rutas y tiempos para cada producto hace que la cantidad de combinaciones posibles de distribución de carga en las máquinas sea demasiado elevada como para ser capaz de abordarla de forma manual y que la distribución sea óptima, además de no tener la certeza si se será capaz de cumplir con todos los pedidos o si habrá algunos que no se podrán hacer.

Otro problema muy grande del bajo volumen de productos y gran cantidad de partidas es que para cada cambio de modelo se debe realizar un Set Up, el cual se realizará de forma manual, por lo que la máquina se debe detener y realizar la preparación.

A esta problemática debemos añadir que en muchos casos, una vez realizada la planeación de la producción se reciben modificaciones por parte del cliente, el cual suele cambiar la prioridad de entrega

de los productos o modificar la cantidad deseada, lo cual conlleva una modificación a todo el plan. Por último, es común que en cada pedido se incluyan artículos que no se habían fabricado antes, a ellos se les anexa un plano con las especificaciones del producto a fabricar y en ocasiones la materia prima que se necesita para su fabricación, puesto que dependiendo del tipo de soldadura y conductividad que requieran del material, será una u otra aleación la que se le asigne al electrodo. Este tipo de modificaciones de último momento obligan a reestructurar el trabajo, y cada pedido nuevo o modificado debe seguir un proceso “burocrático” que ralentiza el avance en fábrica.

A lo largo del tiempo y utilizando los medios disponibles por parte del personal, se han ido realizando hojas de Microsoft Excel® en las cuales se intentan hacer las funciones de un ERP que gestione los requisitos de materiales por cada producto que se debe fabricar. Esto es de gran ayuda porque facilita la labor del personal del almacén para a su vez solicitar los materiales que va a necesitar.

El personal se ha valido con los conocimientos adquiridos a través de la experiencia para desarrollar sencillos programas, con ayuda de Microsoft Excel® en su mayoría, que les permitan automatizar ciertas funciones, a pesar de ello no tienen ningún fundamento teórico o matemático, sino que han sido realizadas a modo de prueba y error.

En lo que respecta a la programación de la producción, en concreto a la secuenciación y ordenación de colas no existe ninguna metodología para su realización; esto se hace completamente por experiencia de la persona responsable del proceso, basándose en sus conocimientos sobre las operaciones que puede realizar cada máquina, y en el histórico, esto es, dónde se han realizado anteriormente, con el conocimiento que tiene sobre las tareas que cada operario es capaz de realizar y estima el tiempo que cada uno podría tardarse en realizar el trabajo asignado en función del tiempo estándar de fabricación. Este método ha funcionado medianamente bien, no obstante está basado completamente en la persona y no en un sistema. Esto lleva a que al faltar la persona conocedora del taller, se suelen tomar decisiones poco acertadas a la hora de organizar la producción.

Al final todo se traduce en un continuo estrés dentro del taller, puesto que la mayor parte del tiempo se trabaja de manera “urgente” y se cambian constantemente los planes, rompiendo el ritmo de fabricación, generando desperfectos y al final del día no se completan los trabajos programados, alimentando la lista de adeudos con el cliente.

5.6 DEFINICIÓN CONCEPTUAL DEL PROBLEMA.

Hemos visto que dentro de la empresa existen varios problemas que es necesario resolver, con todo, es importante centrar el problema en un aspecto concreto que sea posible resolver, en este caso, por medio de la simulación discreta.

Hemos visto en el capítulo tres cómo diferentes autores abordan dos problemas muy significativos dentro de la fabricación: la secuenciación y el makespan.

Dentro de la problemática que se ha descrito de la empresa encontramos claramente estos dos problemas. Por un lado se realiza una secuenciación que en muchas ocasiones no es eficiente, puesto que no se llegan a considerar todos los aspectos que influyen, debido a la gran combinación de posibilidades, que lo deja prácticamente imposible de alcanzar con medios convencionales, como son las hojas de cálculo o el tradicional “prueba y error”.

Por otro lado tenemos el problema del makespan, en ocasiones no será posible realizar todos los pedidos que se han solicitado dentro del horizonte planificado. Cuando éste sea el caso, es muy importante saber qué pedidos se deben hacer en base a la prioridad que cada uno tiene y qué pedidos se tendrá que dejar para una posterior programación, de modo que se cumpla adecuadamente con el plan y la prioridad de cada cliente. De igual manera, con esta programación, es posible brindarle al cliente una fecha estimada de entrega del pedido.

Para resolver ambos problemas se desarrollarán en el siguiente Capítulo una serie de modelos de simulación resueltos a través del software ARENA.

6. SIMULACIÓN DEL PROBLEMA.

Tras explicar en qué consiste la simulación y describir la empresa en estudio y el producto a fabricar en capítulos anteriores.

6.1 INTRODUCCIÓN.

En el presente capítulo se van a presentar unos modelos de simulación con rutas alternativas para talleres tipo “job shop”, particularizados para el sistema de fabricación objeto de estudio. Para ello, en primer lugar, se plantea el enunciado del problema a analizar según los datos aportados en el trabajo de fin de máster del cual se va a realizar la planificación operativa y a continuación se muestran los datos disponibles en el sistema real. Finalmente se plantearán las simulaciones que se ejecutarán en el siguiente capítulo con varios escenarios.

6.2 ENUNCIADO DEL PROBLEMA.

Para elaborar las simulaciones en un taller tipo job shop se considerará un sistema conformado por una serie de estaciones de máquinas. Cada estación posee máquinas idénticas funcionalmente hablando, esto es, son capaces de realizar las mismas operaciones. Cada pedido se considera un solo producto a fabricar con una cantidad o demanda de cada uno conocida. Cada producto tiene varias rutas alternativas por las cuales puede ser fabricado. Para cada ruta se especifica la máquina en la cual será fabricado y el tiempo de procesamiento en dicha ruta.

Para la formulación del problema, se conoce el horizonte de planificación, de forma que tanto la asignación de rutas que seguirán los productos seleccionados como la asignación de herramientas a máquinas serán para ese horizonte, y hasta que finalice el periodo no se podrá volver a cargar el sistema de nuevo.

Se debe mencionar que el sistema que analizaremos no posee todos los elementos de un Sistema de Fabricación Flexible como se ha definido anteriormente. Elementos de un SFF como son un carro guiado para el transporte de materiales, o un “cerebro central” que controle todas las operaciones que se realizan no están presentes en este sistema. Sin embargo, las distancias para el transporte de materiales son tan cortas que se consideran despreciables. Igualmente, al no contar con un sistema automatizado de cambio de herramienta, el modelo incorpora la consideración de los tiempos de Set Up para cada

producto en cada máquina, de esta forma cada vez que un producto se termina de procesar en la máquina y en la ruta que le corresponde, la máquina en cuestión deberá ser preparada para fabricar el siguiente.

Para el sistema objeto de estudio, el horizonte de planificación es semanal y las demandas fueron obtenidas a través de datos históricos de los años 2013 y 2014, y comparadas contra datos en los meses de Abril y Mayo del año 2015, de manera que pudiera determinarse un volumen de producción semanal, el cual nos servirá como horizonte de planificación. Las rutas de procesado de cada producto originalmente son únicas para evitar un mayor cálculo del plan de producción real. A pesar de ello, para este trabajo se incorpora una segunda ruta alternativa para cada producto a partir de la experiencia del director de la línea de producción.

6.3 DATOS DEL PROBLEMA.

Se deben fabricar 18 piezas diferentes. En la tabla siguiente se muestra para cada pieza a fabricar: la cantidad demandada, y la prioridad de fabricación, la prioridad es mayor en tanto mayor sea la cantidad demanda del producto. Se han estimado en base a fechas de entrega, sumando en este caso 1.

Demanda	Tipo de Pieza	Prioridad
31	1	0,07
35	2	0,1
50	3	0,06
10	4	0,051
10	5	0,09
50	6	0,048
10	7	0,04
36	8	0,049
56	9	0,08
30	10	0,03
28	11	0,05
14	12	0,047
7	13	0,047
36	14	0,047
8	15	0,03
12	16	0,053
5	17	0,053
10	18	0,055

Tabla 5 Demanda del período

Cada pieza tiene 2 rutas alternativas para su fabricación y cada ruta consiste en 1, o 2 operaciones. En la tabla siguiente se muestra para cada pieza las rutas y el orden de sus operaciones, indicándose para cada operación: la máquina requerida (estación) y el tiempo de la operación, T_{máq}1, 2 (en minutos).

Demanda	Tipo de pieza	Ruta	Máq. ruta 1	T _{máq} 1	Máq. ruta 2	T _{máq} 2
31	1	1	9	47,5	6	31
31	1	2	1	30		
35	2	1	3	12		
35	2	2	7	16		
50	3	1	7	20		
50	3	2	2	11		
10	4	1	3	40		
10	4	2	7	26		
10	5	1	3	42	2	25
10	5	2	4	10		
50	6	1	8	37,5	5	17
50	6	2	4	20		
10	7	1	2	50		
10	7	2	6	13		
36	8	1	7	20	5	29
36	8	2	3	3,5	2	6
56	9	1	1	39		
56	9	2	2	17		
30	10	1	7	14,7	2	12
30	10	2	3	12,5	6	6
28	11	1	3	23	6	30
28	11	2	7	17	2	7
14	12	1	6	13	2	27
14	12	2	2	11	6	27
7	13	1	3	47	6	27
7	13	2	7	10	2	17
36	14	1	4	59		
36	14	2	2	20		
8	15	1	2	15,6		
8	15	2	6	16,4		
12	16	1	2	38,25		
12	16	2	6	40		
5	17	1	5	55		
5	17	2	6	11,5		
10	18	1	2	12,58		
10	18	2	6	15,9		

Tabla 6 Características de las operaciones de cada pedido

A la simulación se le añade también el tiempo de Set Up (TSUp1, 2) de cada máquina. Como se mencionó al principio, debido a que no funciona como un SFF automatizado y la función de Set Up debe ser realizado de forma manual. Cada producto en cada máquina tiene un tiempo de Set Up diferente. Este tiempo solo se considera una vez por cada producto, puesto que una vez que se inicia con la fabricación del lote este se termina por completo antes de realizar cambios en la máquina. Al finalizar la fabricación de un producto en la máquina de la ruta, a dicha máquina se le realizará un Set Up en caso de que otro producto pase por ella, esta operación se realiza de forma manual por parte del operario encargado de dicha máquina. La información está desplegada en la tabla siguiente (en minutos).

Tipo de pieza	Ruta	Operación 1		Operación 2	
		Maq1	TSUp1	Maq2	TSUp2
1	1	9	5	6	5
	2	1	10		
2	1	3	6		
	2	7	1		
3	1	7	5		
	2	2	5		
4	1	3	5		
	2	7	3		
5	1	3	5	2	4
	2	4	7		
6	1	8	5	5	3
	2	4	7		
7	1	2	6		
	2	6	0		
8	1	7	5	5	3
	2	3	4	2	4
9	1	1	5		
	2	2	4		
10	1	7	5	2	5
	2	3	6	6	0
11	1	3	6	6	5
	2	7	0	2	5
12	1	6	6	2	5
	2	2	4	6	0
13	1	3	4	6	0
	2	7	5	2	5
14	1	4	3		
	2	2	4		
15	1	2	10		
	2	6	0		

16	1	2	5	
	2	6	0	
17	1	5	3	
	2	6	0	
18	1	2	4	
	2	6	0	

Tabla 7 Tempos de Set Up de cada pedido en cada máquina

Los modelos de programación entera propuestos en el TFM mostraron que la mejor forma de lograr una carga más óptima de las máquinas y equilibrada, distribuyéndola a lo largo de las diferentes estaciones y rutas diferentes, era repartir la demanda entre las dos rutas posibles en la tabla siguiente se muestran el número de piezas que pasan por cada ruta:

Demanda	Tipo de pieza	Utilización ruta 1	Nº piezas por ruta 1	Nº piezas por ruta 2
31	1	0,98	30	1
35	2	1	35	0
50	3	0,875	44	6
10	4	1	10	0
10	5	0	0	10
50	6	0,78	39	11
10	7	0	0	10
36	8	0,42	15	21
56	9	0,82	46	10
30	10	0	0	30
28	11	0,09	3	25
14	12	1	14	0
7	13	0,02	0	7
36	14	0,65	23	13
8	15	0	0	8
12	16	0,97	12	0
5	17	0,45	2	3
10	18	0	0	10

Tabla 8 Selección de rutas y reparto de piezas

6.4 INTRODUCCIÓN DE DATOS EN ARENA.

En esta sección se explicará cómo se han introducidos los datos del problema en el software ARENA para simular el entorno Job Shop. Las simulaciones se han dividido entre modelos por lotes de productos y modelos por lotes de transferencia unitario. Los lotes se basan en los datos arrojados por el análisis de carga de máquinas y selecciones de rutas explicada en la sección anterior, en la que determinados tipos de piezas podían dividirse entre las dos rutas, así que en las simulaciones se considera que al dividirse el pedido, constituye dos lotes diferentes con diferente número de piezas a fabricar aunque el tipo de pieza sea el mismo, de este modo, los 18 tipos de piezas se dividen en 26 pedidos o lotes.

Tipo de pieza	Orden	Demanda	Maq1	Tmaq1	Maq2	Tmaq2	Peso
1	6	30	9	48	6	31	0,07
1	5	1	1	30			0,07
2	1	35	3	12			0,1
3	8	44	7	20			0,06
3	7	6	2	11			0,06
4	13	10	3	40			0,051
5	2	10	4	10			0,09
6	19	39	8	38	5	17	0,048
6	18	11	4	20			0,048
7	24	10	6	13			0,04
8	17	15	7	20	5	29	0,049
8	16	21	3	4	2	6	0,049
9	4	46	1	39			0,08
9	3	10	2	17			0,08
10	25	30	3	13	6	6	0,03
11	15	3	3	23	6	30	0,05
11	14	25	7	17	2	7	0,05
12	21	14	6	13	2	27	0,047
13	20	7	7	10	2	17	0,047
14	23	23	4	59			0,047
14	22	13	2	20			0,047
15	26	8	6	16			0,03
16	11	12	2	38			0,053
17	12	2	5	55			0,053
17	10	3	6	12			0,053
18	9	10	6	16			0,055

Tabla 9 Lista de lotes

6.4.1 MODELOS POR LOTES.

Los 26 lotes se ordenan según la prioridad dada por la empresa, así en los sucesivos modelos los lotes irán “entrando” en el sistema según distintos órdenes ya sea por prioridad o por tiempo total de fabricación.

Ahora veremos cómo se ha simulado en ARENA.

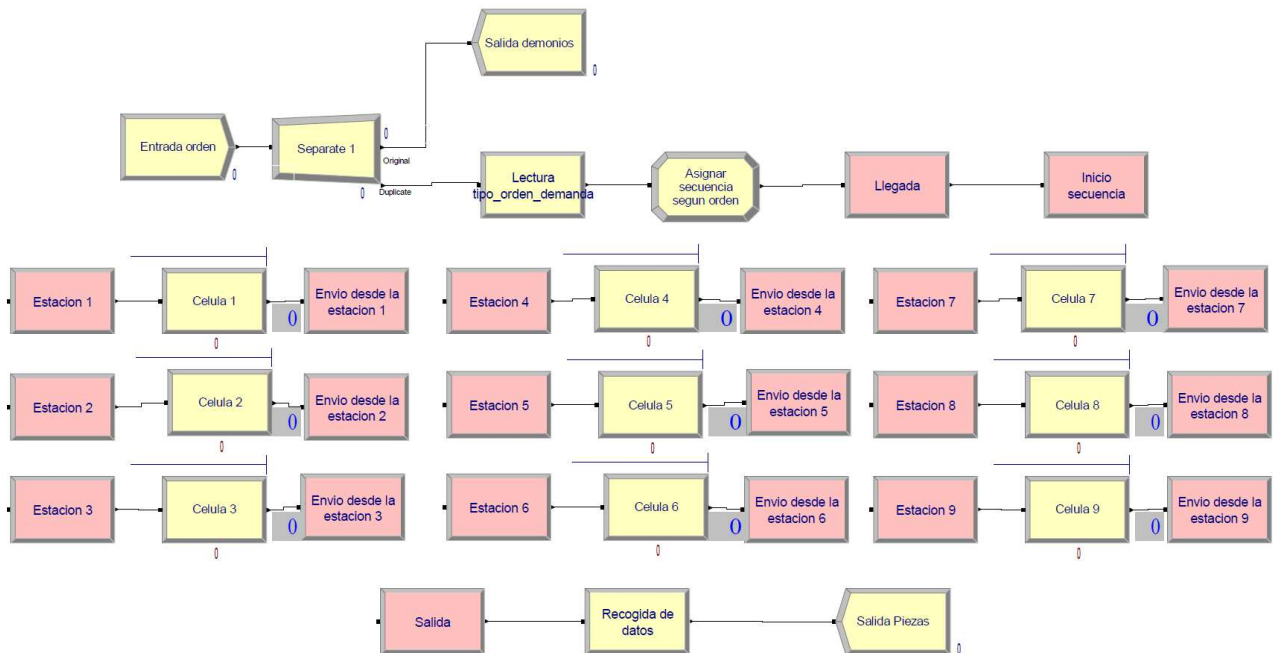


Figura 38 Modelo por lotes básico

El primer módulo en toda simulación en ARENA es un Create, como ya se explicó en el capítulo 4 este módulo se encarga de iniciar el sistema introduciendo las entidades iniciales en el sistema, en nuestro caso solo se introduce una entidad al comienzo de la simulación.

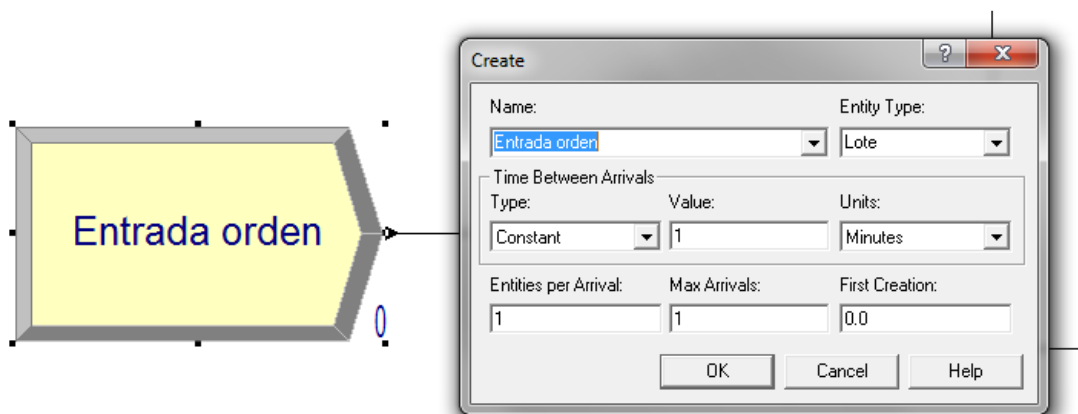


Figura 39 Create, módulo inicial

El siguiente módulo de la simulación es un Separate, este módulo duplica la entidad inicial creada anteriormente en 26 nuevas entidades, una por cada lote.

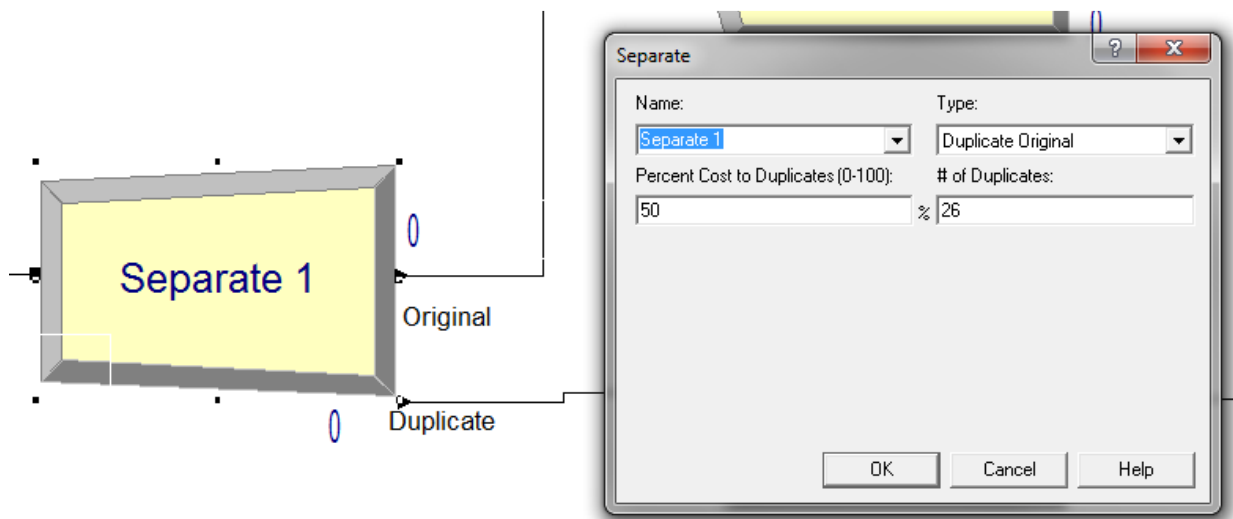


Figura 40 Separate, creación de lotes

El siguiente módulo es un ReadWrite, en él se leen los datos desde una hoja Excel para alimentar al sistema, en este caso los datos que lee son: el tipo de pieza, orden y demanda (nº de piezas por lote). El orden hace referencia a la ordenación por prioridad explicada antes, en nuestro caso al lote con mayor prioridad tiene valor de orden 1 y el lote menos prioritario tiene valor de orden 26.

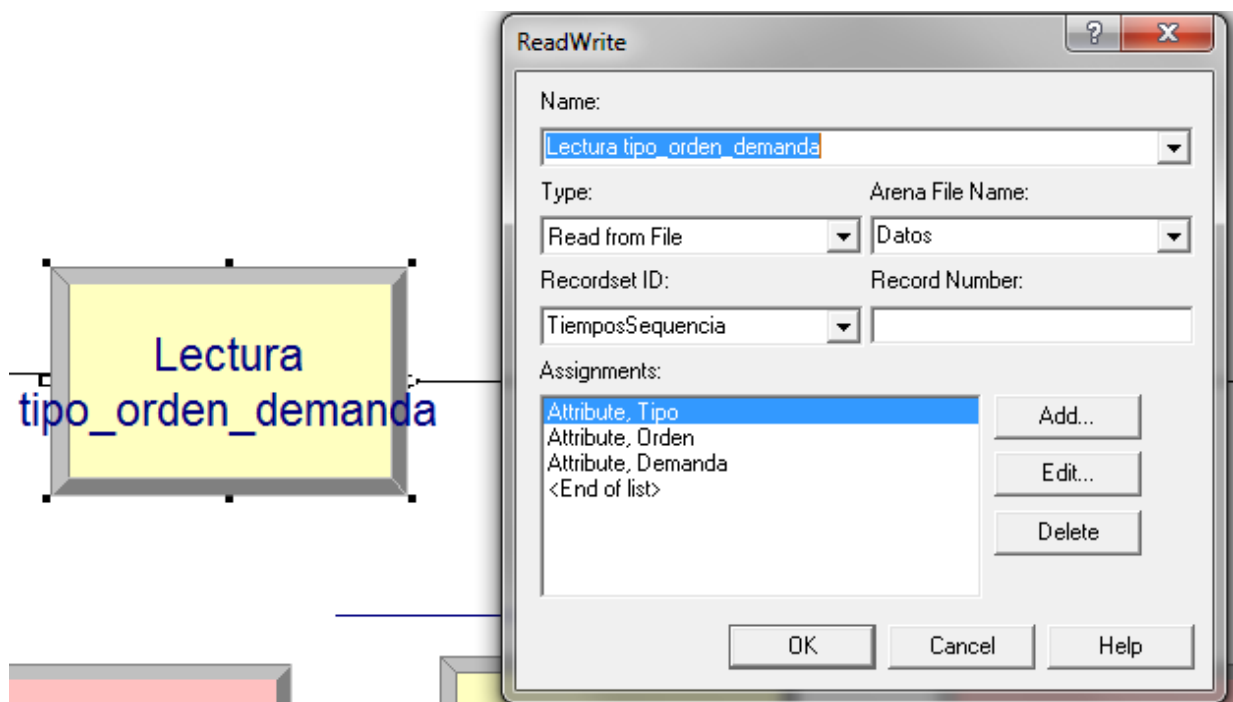


Figura 41 ReadWrite, lectura de datos

El siguiente módulo supone la mayor complejidad de la simulación, la asignación de secuencias, se le asigna un atributo Entity.Sequence a cada lote dependiendo del tipo de pieza al que haga referencia el lote, las secuencias están ordenadas según la prioridad, es decir, la primera secuencia que se ha escrito es la de la pieza más prioritaria y por ello se lee en primer lugar, orden 1, la siguiente entidad o lote será orden 2 asignándosele la secuencia número 2.

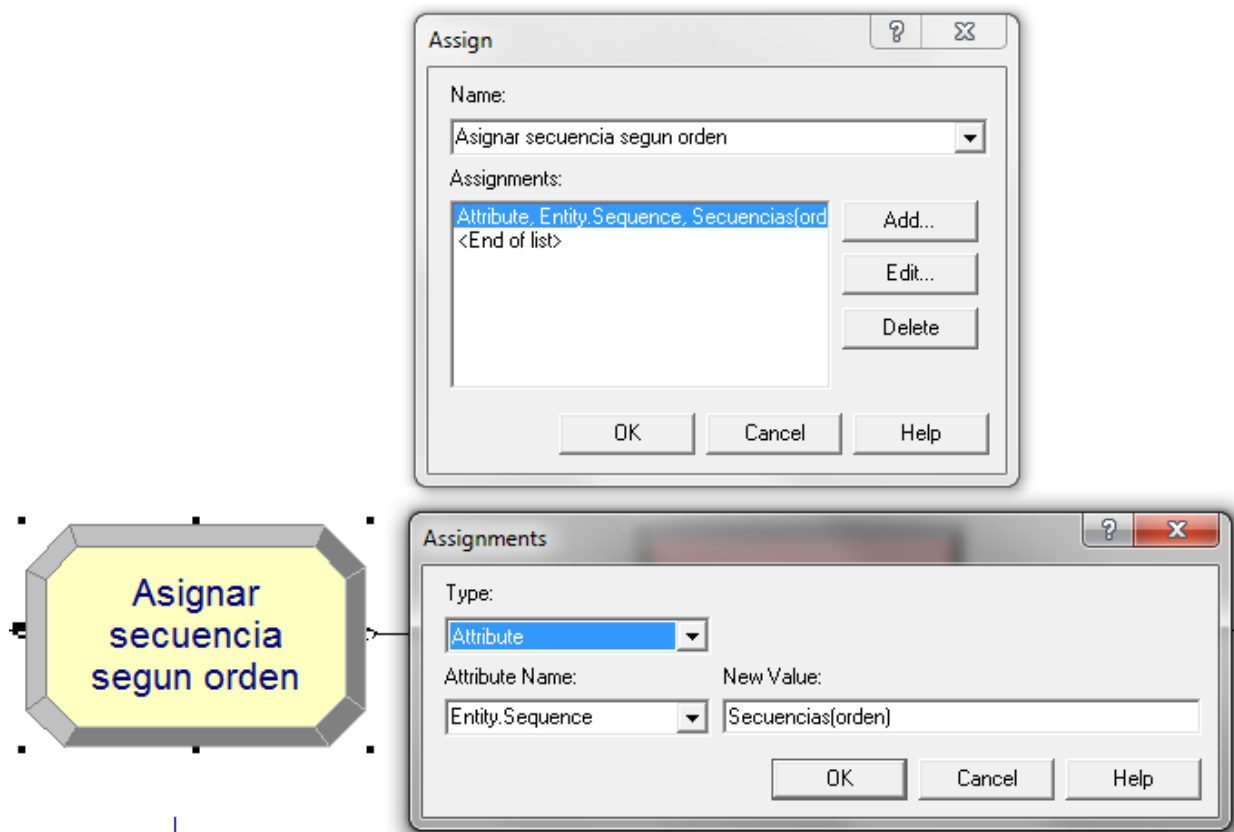


Figura 42 Assign, asignación de secuencia a lotes

Las 26 secuencias han sido definidas dentro del programa, primero definiendo las estaciones que forman la secuencia, las estaciones son lugares físicos, en estas los atributos: tiempo de proceso y tiempo de Set Up, de la entidad cambian y tras llegar a la estación se encuentran con la máquina que hay en esa estación, dicha máquina tomará los valores actuales de esos atributos, así en cada estación el tiempo de proceso y el tiempo de Set Up que tiene la entidad es distinto. Y después en cada estación definiendo cuál es el tiempo de proceso del lote, esto es, el tiempo que está la entidad dentro de la máquina, también se defina el tiempo de Set Up distinto según tipo de pieza y máquina. Cuando se define una secuencia en ARENA hay que definir también una estación final en la salga la entidad del sistema, es por así decirlo una estación “fantasma” ya que en ella no se manda a la pieza a una máquina sino que se manda a la salida del sistema. En la figura siguiente se observa que aunque el lote vaya a ser procesado solo por una máquina tiene una secuencia con dos estaciones.

Sequence - Advanced Transfer

	Name	Steps
1	Sequence 1	2 rows
2	Sequence 2	2 rows
3	Sequence 3	2 rows
4	Sequence 4	2 rows
5	Sequence 5	2 rows
6	Sequence 6	3 rows
7	Sequence 7	2 rows
8	Sequence 8	2 rows
9	Sequence 9	2 rows
10	Sequence 10	2 rows
11	Sequence 11	2 rows
12	Sequence 12	2 rows
13	Sequence 13	2 rows
14	Sequence 14	3 rows
15	Sequence 15	3 rows
16	Sequence 16	3 rows
17	Sequence 17	3 rows
18	Sequence 18	2 rows
19	Sequence 19	3 rows
20	Sequence 20	3 rows
21	Sequence 21	3 rows
22	Sequence 22	2 rows
23	Sequence 23	2 rows
24	Sequence 24	2 rows
25	Sequence 25	3 rows
26	Sequence 26	2 rows

Steps

	Station Name	Step Name	Next Step	Assignments
1	Estacion 3			2 rows
2	Salida			0 rows

Double-click here to add a new row.

Assignments

	Assignment Type	Attribute Name	Value
1	Attribute	Tiempo_proceso	12
2	Attribute	Set_Up	6

Double-click here to add a new row.

Figura 43 Sequence, definición de secuencias y parámetros

Los siguientes módulos son una estación y un Route, en el Route la entidad se envía a una estación determinada, dicha estación dependerá del atributo Entity.Sequence que posea la entidad. El módulo nombrado “llegada” define la estación de la que parten todas las secuencias.

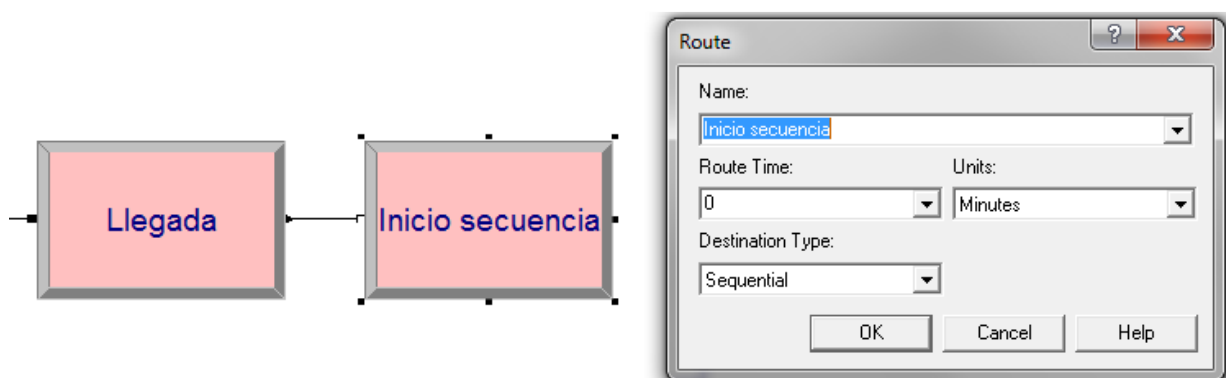


Figura 44 Route, inicio de secuencias

Como puede verse después de cada Route del sistema la entidad se envía dependiendo de su secuencia. El tipo de destino (Destination Type) depende de la secuencia (sequential).

Route - Advanced Transfer				
	Name	Route Time	Units	Destination Type
1	Inicio secuencia	0	Minutes	Sequential
2	Envio desde la estacion 1	0	Minutes	Sequential
3	Envio desde la estacion 2	0	Minutes	Sequential
4	Envio desde la estacion 3	0	Minutes	Sequential
5	Envio desde la estacion 4	0	Minutes	Sequential
6	Envio desde la estacion 5	0	Minutes	Sequential
7	Envio desde la estacion 6	0	Minutes	Sequential
8	Envio desde la estacion 7	0	Minutes	Sequential
9	Envio desde la estacion 8	0	Minutes	Sequential
10	Envio desde la estacion 9	0	Minutes	Sequential

Figura 45 Lista de routes

Cada estación consta de tres módulos, Station, Process y Route. La estación define el lugar físico donde se encuentra la entidad y los parámetros tiempo de proceso y tiempo de Set Up, el Process determina la máquina, el módulo Route determina la siguiente estación que debe visitar la entidad.

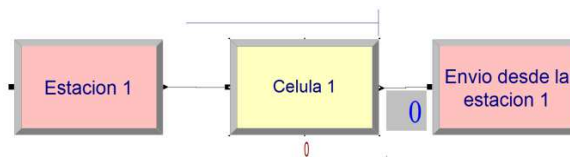


Figura 46 Estación 1

Para definir el tiempo de proceso en cada máquina se debe construir una expresión en el apartado Delay (Retraso o demora) del módulo Process ya que ese apartado define el tiempo que la entidad está dentro de la máquina, al ser lotes la expresión se ha construido multiplicado el tiempo de proceso de cada pieza por la demanda (número de piezas) del lote y sumándole el tiempo de Set Up.

Figura 47 Máquina 1

Como se mencionó anteriormente todas las secuencias deben acabar en la misma estación, esta es la estación salida, que establece el final del sistema, tras la estación salida se encuentra un módulo ReadWrite en este caso no lee datos de un Excel sino que recoge atributos de las entidades y los escribe en un Excel, por último tenemos un módulo Dispose por el que las entidades salen del sistema.

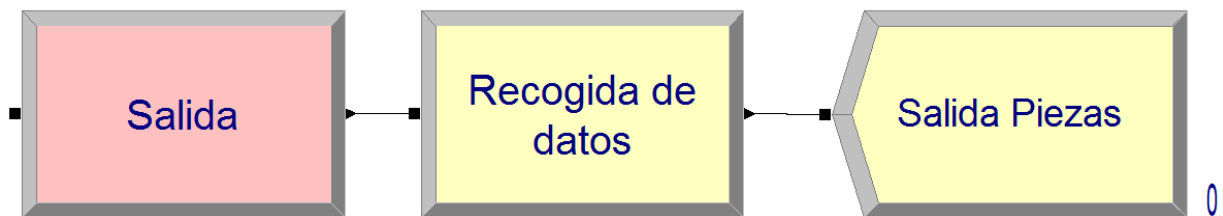


Figura 48 Fase final del sistema

En la siguiente figura se muestra cómo se establecen los archivos Excel de los que los módulos ReadWrite leen o escriben datos, dentro de las tablas Excel hay que definir una selección de datos, dicha selección o rango de datos (Named Range) debe delimitarse para que ARENA lea solo los datos establecidos.

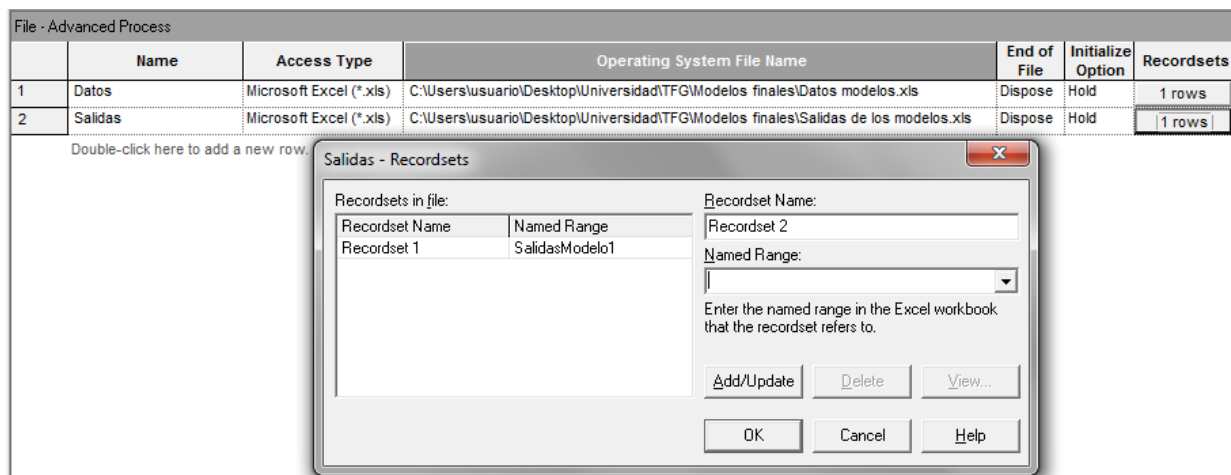


Figura 49 File, lectura y escritura de datos

6.4.1.1 MODELO POR LOTES, ORDEN MAYOR PRIORIDAD, COLAS FIFO.

En el primer modelo por lotes, se han ordenado las llegadas de los lotes según la prioridad.

Tipo de pieza	Orden	Demanda	Maq1	Tmaq1	Maq2	Tmaq2	W
2	1	35	3	12			0,1
5	2	10	4	10			0,09
9	3	10	2	17			0,08
9	4	46	1	39			0,08
1	5	1	1	30			0,07
1	6	30	9	48	6	31	0,07
3	7	6	2	11			0,06
3	8	44	7	20			0,06
18	9	10	6	16			0,055
17	10	3	6	12			0,053
16	11	12	2	38			0,053
17	12	2	5	55			0,053
4	13	10	3	40			0,051
11	14	25	7	17	2	7	0,05
11	15	3	3	23	6	30	0,05
8	16	21	3	4	2	6	0,049
8	17	15	7	20	5	29	0,049
6	18	11	4	20			0,048
6	19	39	8	38	5	17	0,048
13	20	7	7	10	2	17	0,047
12	21	14	6	13	2	27	0,047
14	22	13	2	20			0,047
14	23	23	4	59			0,047
7	24	10	6	13			0,04
10	25	30	3	13	6	6	0,03
15	26	8	6	16			0,03

Tabla 10 Ordenación por prioridad

En este modelo, dado que distintos lotes pueden utilizar la misma máquina se ha aplicado la regla de despacho FIFO para las colas de las máquinas a fin de obtener un orden en las mismas.

Queue - Basic Process				
	Name	Type	Shared	Report Statistics
1	Celula 1.Queue	First In First Out	☐	☒
2	Celula 2.Queue	First In First Out	☐	☒
3	Celula 3.Queue	First In First Out	☐	☒
4	Celula 4.Queue	First In First Out	☐	☒
5	Celula 5.Queue	First In First Out	☐	☒
6	Celula 6.Queue	First In First Out	☐	☒
7	Celula 7.Queue	First In First Out	☐	☒
8	Celula 8.Queue	First In First Out	☐	☒
9	Celula 9.Queue	First In First Out	☐	☒

Figura 50 Colas modelo FIFO

6.4.1.2 MODELO POR LOTES, ORDEN MAYOR PRIORIDAD, COLAS LVA ORDEN.

En este modelo por lotes se diferencia del anterior aplicando una regla de despacho distinta dentro de las colas de las máquinas, se secuencian según el tipo LVA del atributo orden, es decir, en una misma cola los lotes con mayor prioridad entrarán primero en la máquina. Como se explicó anteriormente a menor valor del atributo orden mayor prioridad.

Queue - Basic Process					
	Name	Type	Attribute Name	Shared	Report Statistics
1	Celula 1.Queue	Lowest Attribute Value	Orden	☐	☒
2	Celula 2.Queue	Lowest Attribute Value	Orden	☐	☒
3	Celula 3.Queue	Lowest Attribute Value	Orden	☐	☒
4	Celula 4.Queue	Lowest Attribute Value	Orden	☐	☒
5	Celula 5.Queue	Lowest Attribute Value	Orden	☐	☒
6	Celula 6.Queue	Lowest Attribute Value	Orden	☐	☒
7	Celula 7.Queue	Lowest Attribute Value	Orden	☐	☒
8	Celula 8.Queue	Lowest Attribute Value	Orden	☐	☒
9	Celula 9.Queue	Lowest Attribute Value	Orden	☐	☒

Figura 51 Colas modelo LVA (Orden)

6.4.1.3 MODELO POR LOTES, ORDEN MENOR TIEMPO TOTAL DEL LOTE CON SET UP, COLAS FIFO.

En este modelo por lotes, estos se han ordenado antes de entrar en el sistema según el tiempo total de fabricación de dicho lote, esto es, el tiempo en procesarse la máquina 1 y en la máquina 2 (si se procesa en dos máquinas) más los tiempos de Set Up correspondientes a cada máquina. En caso de coincidir dos lotes en la misma máquina se aplicará la regla de despacho FIFO.

Tipo	Orden	Demanda	Maq1	Tmaq1	TSUp1	Maq2	Tmaq2	TSUp2	W	T ^o *Dem
17	1	3	6	12					0,053	36
1	2	1	1	30	10				0,07	40
3	3	6	2	11	5				0,06	71
5	4	10	4	10	7				0,09	107
17	5	2	5	55	3				0,053	113
15	6	8	6	16					0,03	128
7	7	10	6	13					0,04	130
18	8	10	6	16					0,055	160
11	9	3	3	23	6	6	30	5	0,05	170
9	10	10	2	17	4				0,08	174
13	11	7	7	10	5	2	17	5	0,047	199
8	12	21	3	4	4	2	6	4	0,049	218
6	13	11	4	20	7				0,048	227
14	14	13	2	20	4				0,047	264
4	15	10	3	40	5				0,051	405
2	16	35	3	12	6				0,1	426
16	17	12	2	38	5				0,053	461
12	18	14	6	13	6	2	27	5	0,047	571
10	19	30	3	13	6	6	6		0,03	576
11	20	25	7	17		2	7	5	0,05	605
8	21	15	7	20	5	5	29	3	0,049	743
3	22	44	7	20	5				0,06	885
14	23	23	4	59	3				0,047	1360
9	24	46	1	39	5				0,08	1799
6	25	39	8	38	5	5	17	3	0,048	2153
1	26	30	9	48	5	6	31	5	0,07	2380

Tabla 11 Ordenación por tiempo total de fabricación

6.4.1.4 MODELO POR LOTES, ORDEN MENOR TIEMPO TOTAL DEL LOTE CON SET UP, COLAS LVA ORDEN.

Este modelo difiere del anterior por la regla de despacho que se aplica en las colas de las máquinas cuando hay dos lotes esperando, en este modelo regla LVA según el valor del atributo orden, los lotes que tenga menor tiempo de fabricación total en el sistema entrarán primero a la máquina.

6.4.1.5 MODELO POR LOTES, ORDEN MENOR TIEMPO TOTAL DEL LOTE CON SET UP, COLAS LVA TIEMPO EN ESTACIÓN.

En esta variante del modelo por lotes anterior se ha introducido un nuevo atributo, TEstacion siendo el tiempo de proceso en la estación multiplicado por la demanda más el tiempo de Set Up de la estación del lote en la máquina. Este atributo se le asigna a cada entidad según la estación actual en la que se encuentre a través de un módulo Assign en cada estación.

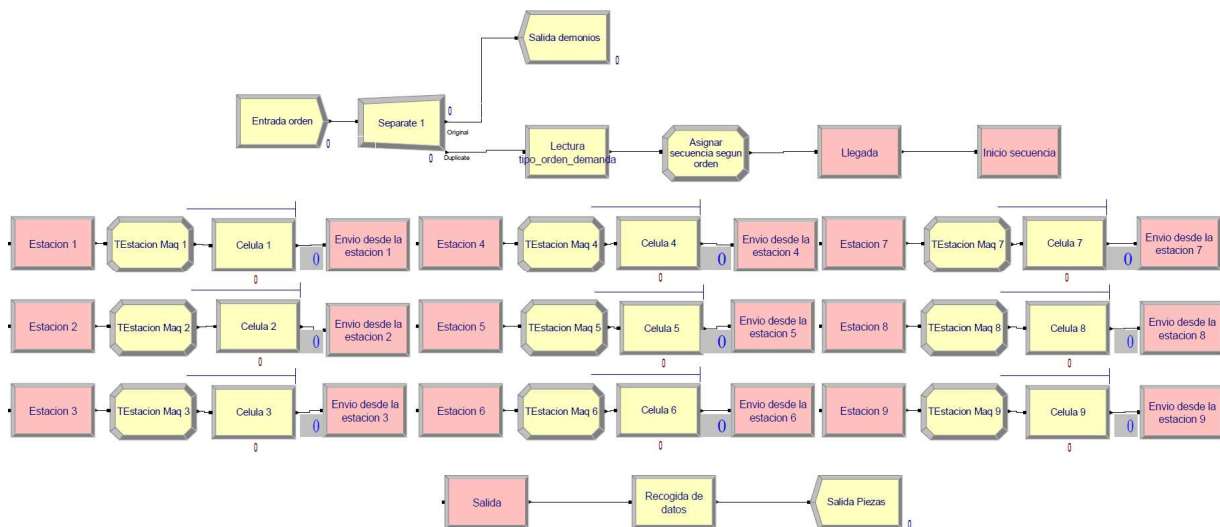


Figura 52 Modelo por lotes LVA (TEstación)

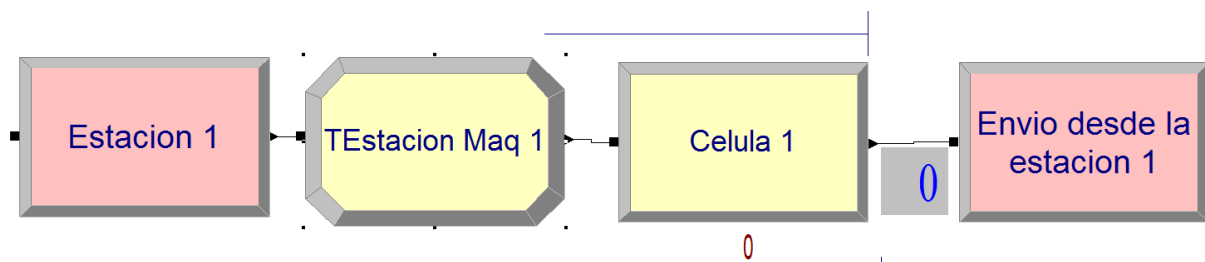


Figura 53 Nueva configuración las estaciones

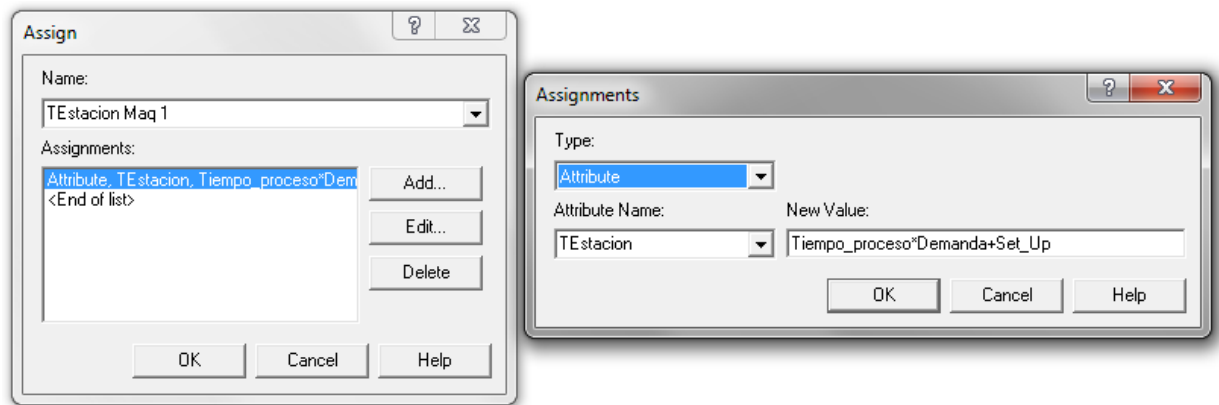


Figura 54 Assign, TEstacion

Una vez que a la entidad se le ha asignado el nuevo atributo, la regla de despacho aplicada a las colas de las máquinas consiste en LVA, pero en este modelo entrará primero en la máquina aquel lote que vaya a estar menos tiempo dentro de la máquina, es decir, el lote que posea menor valor de Testación.

Queue - Basic Process					
	Name	Type	Attribute Name	Shared	Report Statistics
1	Celula 1.Queue	Lowest Attribute Value	TEstacion	☐	☒
2	Celula 2.Queue	Lowest Attribute Value	TEstacion	☐	☒
3	Celula 3.Queue	Lowest Attribute Value	TEstacion	☐	☒
4	Celula 4.Queue	Lowest Attribute Value	TEstacion	☐	☒
5	Celula 5.Queue	Lowest Attribute Value	TEstacion	☐	☒
6	Celula 6.Queue	Lowest Attribute Value	TEstacion	☐	☒
7	Celula 7.Queue	Lowest Attribute Value	TEstacion	☐	☒
8	Celula 8.Queue	Lowest Attribute Value	TEstacion	☐	☒
9	Celula 9.Queue	Lowest Attribute Value	TEstacion	☐	☒

Figura 55 Colas LVA (TEstación)

6.4.2 MODELOS POR LOTES DE TRANSFERENCIA UNITARIA.

En estos tipos de modelos los lotes se han dividido de forma que cada lote se ha desagrupado tantas veces como piezas tenía. Dichos lotes se han secuenciado antes de entrar en el sistema según la prioridad, así, los más prioritarios entrarán primero. A continuación se muestra el modelo básico, después en cada tipo de modelo se especificarán los cambios al modelo básico.

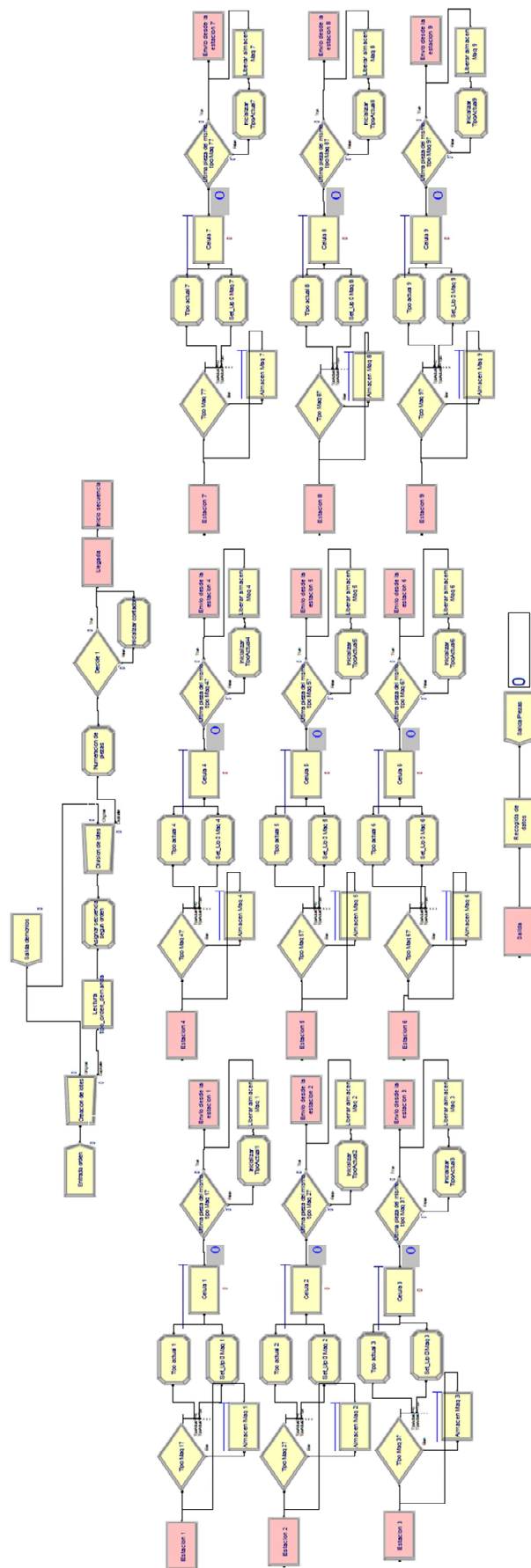


Figura 56 Modelo por lotes de transferencia unitaria ampliado

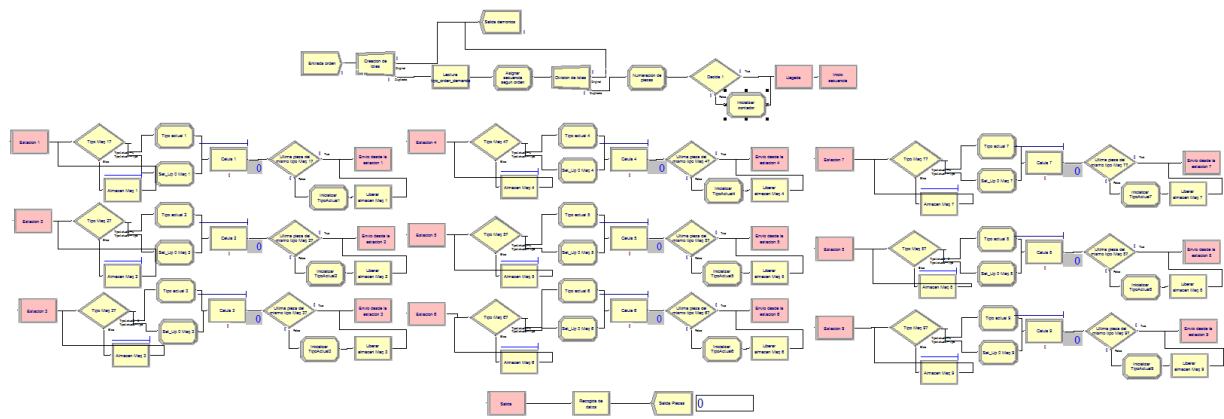


Figura 57 Modelo por lotes de transferencia unitaria

Ampliando la primera parte del modelo podemos ver la división de lotes a través de un Separate.

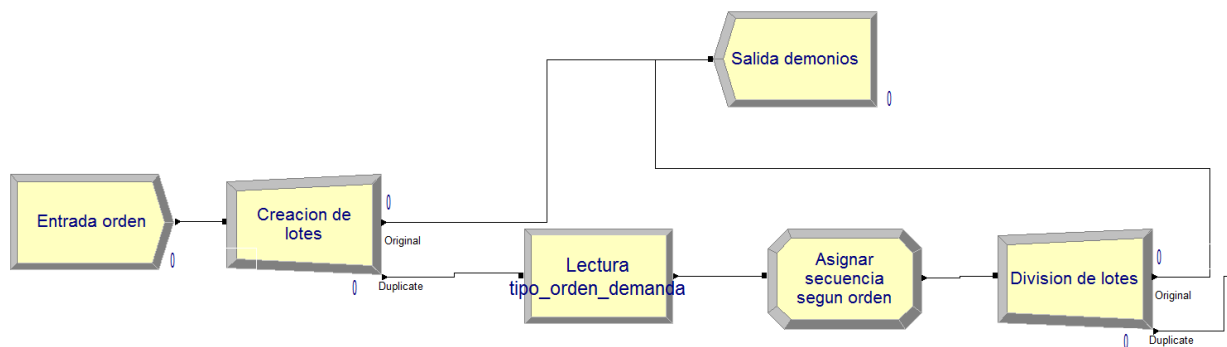


Figura 58 Separate, desagregación de lotes

Otra parte nueva en los modelos por lotes de transferencia unitaria es que se la asigna a cada pieza un número dentro del lote, esto quiere decir que cada pieza de un lote estará numerada correlativamente de 1 a demanda (número de piezas), cuando pasa por el módulo Decide la pieza con el número Demanda (la última pieza del lote) esta se envía por la rama “False” pasando por el assign “Iniciar contador” iniciando la variable contador, así la siguiente pieza que pase por el Assign “Numeracion de piezas” será numerado para número 1 del nuevo lote.

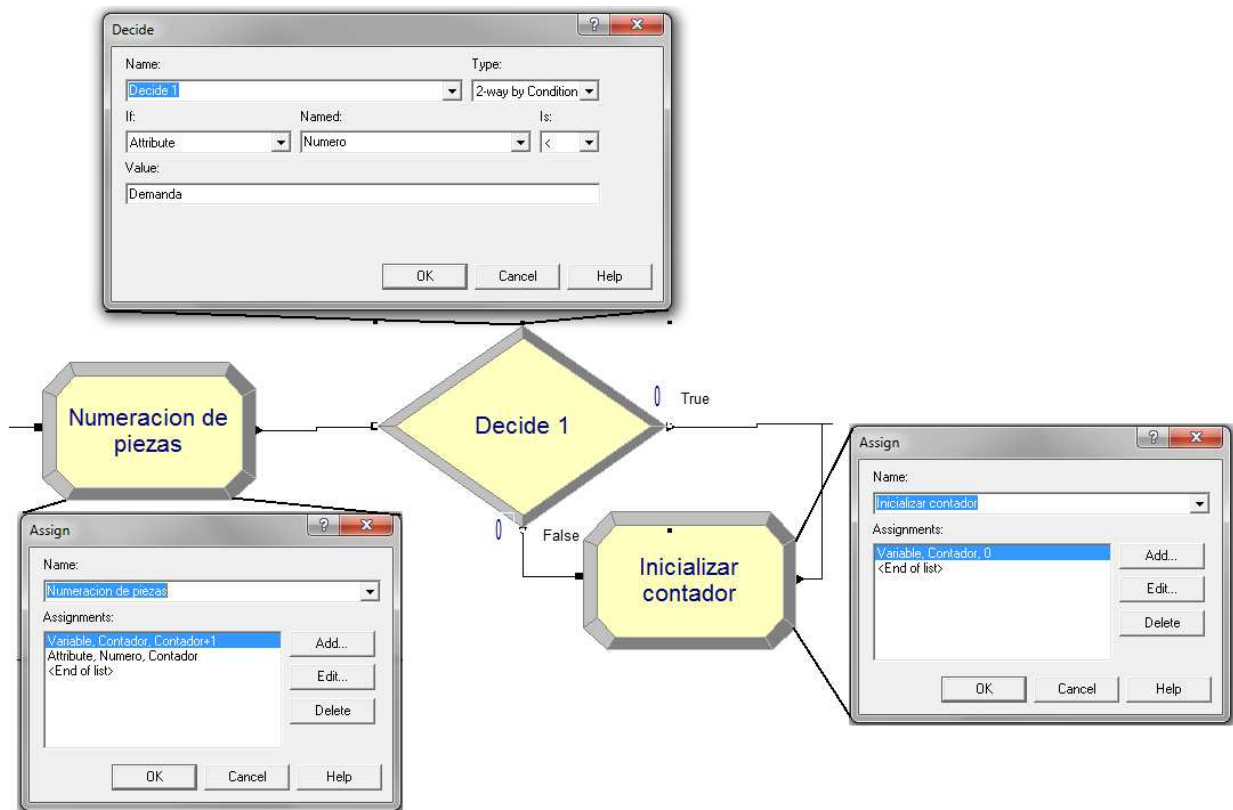


Figura 59 Assigns y decide, numeración de piezas

Ampliando una de las estaciones podemos observar cómo se han introducido módulos nuevos.

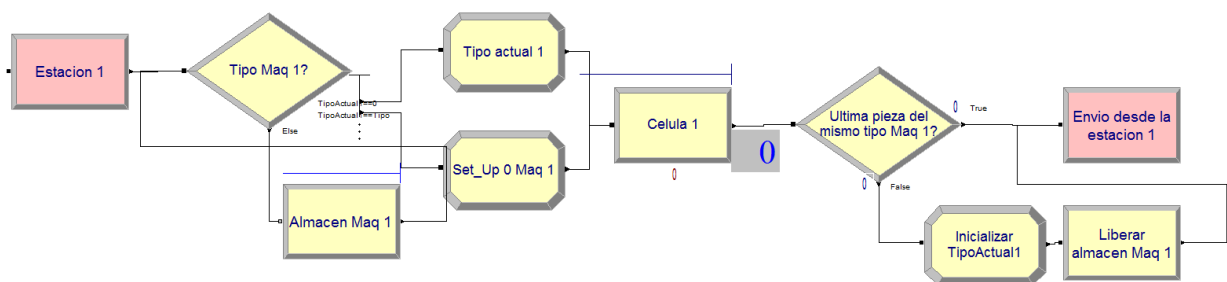


Figura 60 Estación, modelo por lotes de transferencia unitaria

Una vez que la entidad (una pieza de un lote) llega a la estación pasa con un Decide con tres ramas posibles, la primera, cuando la pieza es de un lote “nuevo” en la estación, esto es, por la estación no ha pasado ninguna pieza de ese lote, en ese caso la entidad pasa por el Assign “Tipo actual 1” en este assign se la asigna a la variable “TipoActual1” en mismo valor que tiene el atributo “Tipo” de la entidad, tras esto pasa a la máquina en la cual el tiempo que estará será la suma del tiempo de proceso más el tiempo de Set Up, ya que es la primera de su tipo en entrar en la estación. El siguiente caso es cuando llega a la estación otra pieza que es del mismo tipo que la anterior, en ese caso la entidad pasará por la segunda rama del Decide, tras lo cual irá al Assign “Set_Up 0 Maq 1” en el cual el atributo Set Up de la pieza se igualará a cero para que cuando la pieza pase por la máquina y se la sume al tiempo de proceso el Set Up, solo esté la pieza el tiempo de proceso, ya que al ser del mismo tipo de pieza que la anterior no hay que cambiar la herramienta en la máquina y no hay Set Up. El tercer caso es cuando entra en la estación una pieza de un tipo distinta a la anterior, en ese caso, la entidad irá por la tercera rama del Decide acabando en un almacén en ARENA llamados Holds, en dicho almacén se irán acumulando las piezas de tipos diferentes hasta que el Hold reciba una señal (Wait for Signal).

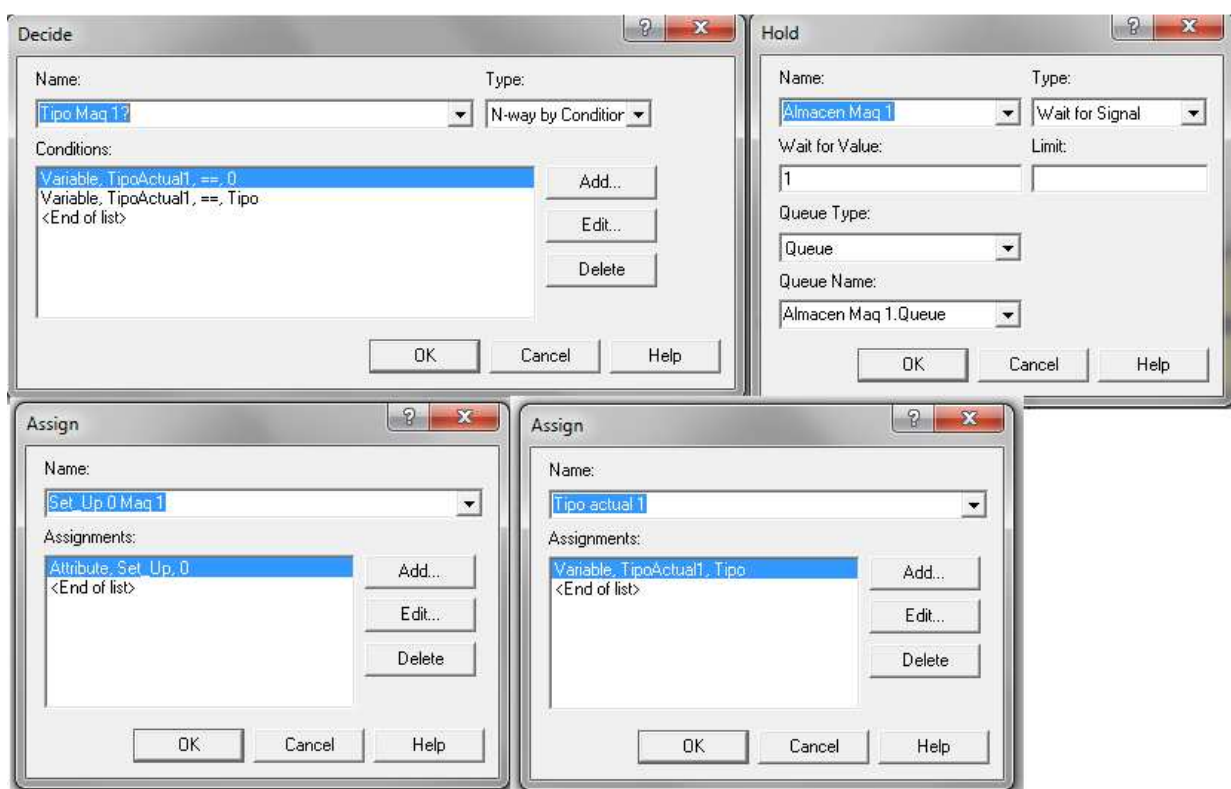


Figura 61 Comprobación de tipo de pieza

Dicha señal se enviará cuando la última pieza del lote anterior pase por el segundo Decide (tras la máquina) al ser la última pieza del lote se cumple que Numero=Demanda y por tanto irá por la rama False del Decide inicializando la variable “TipoActual1” a cero y lanzando finalmente la señal para que las piezas del Hold pasen por el primer Decide repitiéndose así en todo el proceso.

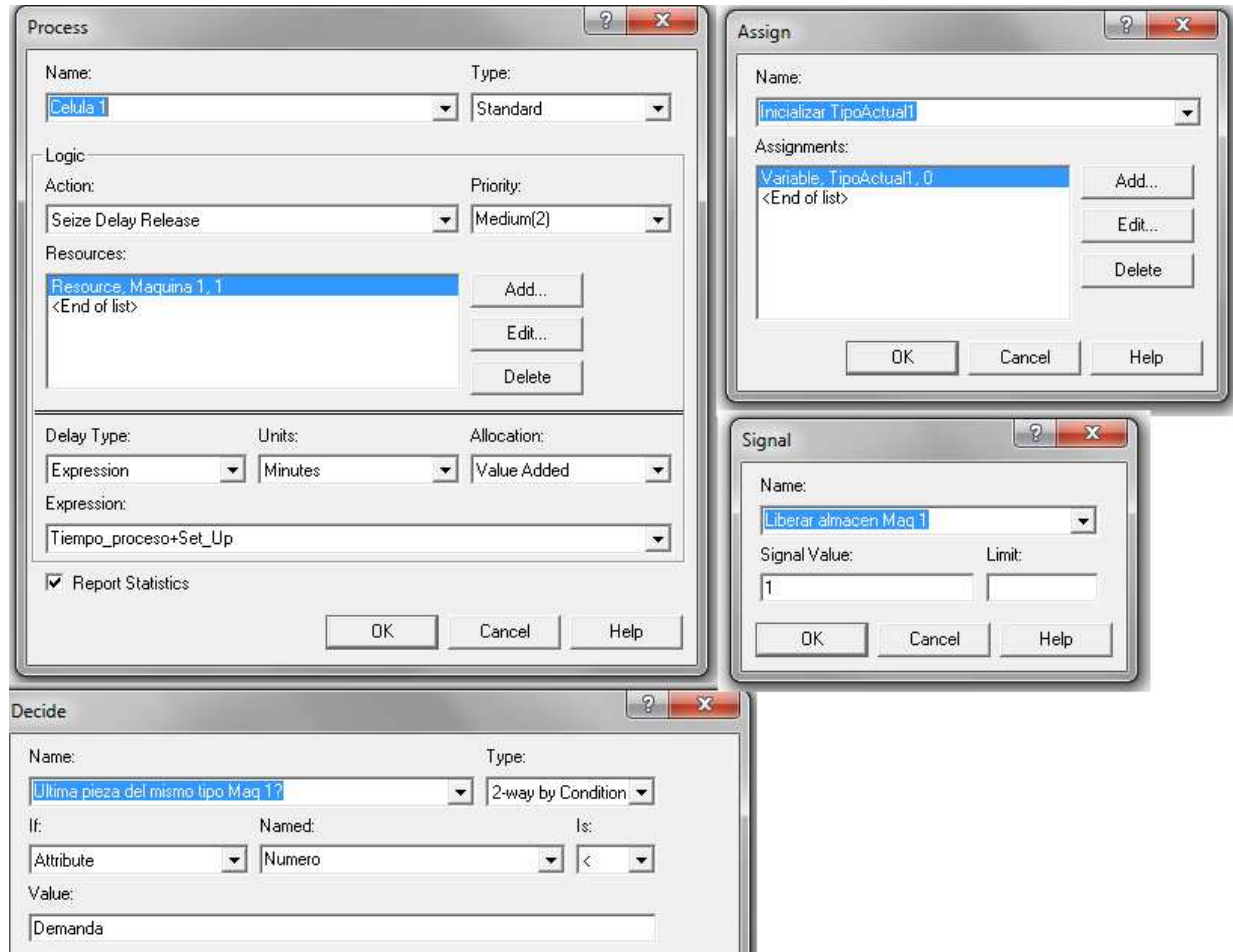


Figura 62 Inicialización de tipo y envío de señal

A continuación, se explicarán las variaciones aplicadas al modelo “básico” por lotes de transferencia unitaria expuesto en las figuras anteriores.

6.4.2.1 MODELO POR LOTES DE TRANSFERENCIA UNITARIA, ORDEN MAYOR PRIORIDAD, COLAS LVA ORDEN.

En este modelo los lotes, antes de ser desagregados en piezas, se ordenan según prioridad, las colas de los Holds o almacenes se le aplican la regla de despacho LVA según el valor de orden, a las entidades con menor valor del atributo orden entran primero, esto es, las piezas más prioritarias entran primero.

Como se puede ver en la siguiente figura, en las colas en las máquinas se mantiene la regla FIFO ya que al ser piezas del mismo tipo y lote poseen la misma prioridad y tiempo de proceso.

Queue - Basic Process					
	Name	Type	Attribute Name	Shared	Report Statistics
1	Celula 1.Queue	First In First Out	Attribute 1	☐	☒
2	Celula 2.Queue	First In First Out	Attribute 1	☐	☒
3	Celula 3.Queue	First In First Out	Attribute 1	☐	☒
4	Celula 4.Queue	First In First Out	Attribute 1	☐	☒
5	Celula 5.Queue	First In First Out	Attribute 1	☐	☒
6	Celula 6.Queue	First In First Out	Attribute 1	☐	☒
7	Celula 7.Queue	First In First Out	Attribute 1	☐	☒
8	Celula 8.Queue	First In First Out	Attribute 1	☐	☒
9	Celula 9.Queue	First In First Out	Attribute 1	☐	☒
10	Almacen Maq 3.Queue	Lowest Attribute Value	Orden	☐	☒
11	Almacen Maq 2.Queue	Lowest Attribute Value	Orden	☐	☒
12	Almacen Maq 1.Queue	Lowest Attribute Value	Orden	☐	☒
13	Almacen Maq 4.Queue	Lowest Attribute Value	Orden	☐	☒
14	Almacen Maq 5.Queue	Lowest Attribute Value	Orden	☐	☒
15	Almacen Maq 6.Queue	Lowest Attribute Value	Orden	☐	☒
16	Almacen Maq 7.Queue	Lowest Attribute Value	Orden	☐	☒
17	Almacen Maq 8.Queue	Lowest Attribute Value	Orden	☐	☒
18	Almacen Maq 9.Queue	Lowest Attribute Value	Orden	☐	☒

Figura 63 Colas LVA (Orden) para los Holds

6.4.2.2 MODELO POR LOTES DE TRANSFERENCIA UNITARIA, ORDEN MAYOR PRIORIDAD, COLAS LVA TIEMPO EN ESTACIÓN.

Como se puede ver en la siguiente figura en este modelo, en las colas en las máquinas se mantiene la regla FIFO ya que al ser piezas del mismo tipo y lote poseen la misma prioridad y tiempo de proceso. Las colas de los Holds o almacenes tienen aplicada la regla de despacho LVA según el valor del tiempo de proceso, las entidades que posean menor tiempo de proceso dentro de la máquina de la estación se secuenciarán antes en la cola del Hold y por tanto entrarán antes en la máquina.

Queue - Basic Process				
	Name	Type	Attribute Name	Shared Report Statistics
1	Celula 1.Queue	First In First Out	Attribute 1	☐ ☒
2	Celula 2.Queue	First In First Out	Attribute 1	☐ ☒
3	Celula 3.Queue	First In First Out	Attribute 1	☐ ☒
4	Celula 4.Queue	First In First Out	Attribute 1	☐ ☒
5	Celula 5.Queue	First In First Out	Attribute 1	☐ ☒
6	Celula 6.Queue	First In First Out	Attribute 1	☐ ☒
7	Celula 7.Queue	First In First Out	Attribute 1	☐ ☒
8	Celula 8.Queue	First In First Out	Attribute 1	☐ ☒
9	Celula 9.Queue	First In First Out	Attribute 1	☐ ☒
10	Almacen Maq 3.Queue	Lowest Attribute Value	Tiempo_proceso	☐ ☒
11	Almacen Maq 2.Queue	Lowest Attribute Value	Tiempo_proceso	☐ ☒
12	Almacen Maq 1.Queue	Lowest Attribute Value	Tiempo_proceso	☐ ☒
13	Almacen Maq 4.Queue	Lowest Attribute Value	Tiempo_proceso	☐ ☒
14	Almacen Maq 5.Queue	Lowest Attribute Value	Tiempo_proceso	☐ ☒
15	Almacen Maq 6.Queue	Lowest Attribute Value	Tiempo_proceso	☐ ☒
16	Almacen Maq 7.Queue	Lowest Attribute Value	Tiempo_proceso	☐ ☒
17	Almacen Maq 8.Queue	Lowest Attribute Value	Tiempo_proceso	☐ ☒
18	Almacen Maq 9.Queue	Lowest Attribute Value	Tiempo_proceso	☐ ☒

Figura 64 Colas LVA (Timepo de proceso) para los Holds

6.4.2.3 MODELO POR LOTES DE TRANSFERENCIA UNITARIA, ORDEN MAYOR PRIORIDAD, COLAS FIFO.

En este modelo, en las colas en las máquinas se mantiene la regla FIFO ya que al ser piezas del mismo tipo y lote poseen la misma prioridad y tiempo de proceso. Las colas de los Holds o almacenes tienen aplicada la regla de despacho FIFO, todas las piezas el primer tipo de pieza que entre al Hold será el primer tipo procesado por la máquina.

Queue - Basic Process				
	Name	Type	Shared	Report Statistics
1	Celula 1.Queue	First In First Out	☐	☒
2	Celula 2.Queue	First In First Out	☐	☒
3	Celula 3.Queue	First In First Out	☐	☒
4	Celula 4.Queue	First In First Out	☐	☒
5	Celula 5.Queue	First In First Out	☐	☒
6	Celula 6.Queue	First In First Out	☐	☒
7	Celula 7.Queue	First In First Out	☐	☒
8	Celula 8.Queue	First In First Out	☐	☒
9	Celula 9.Queue	First In First Out	☐	☒
10	Almacen Maq 3.Queue	First In First Out	☐	☒
11	Almacen Maq 2.Queue	First In First Out	☐	☒
12	Almacen Maq 1.Queue	First In First Out	☐	☒
13	Almacen Maq 4.Queue	First In First Out	☐	☒
14	Almacen Maq 5.Queue	First In First Out	☐	☒
15	Almacen Maq 6.Queue	First In First Out	☐	☒
16	Almacen Maq 7.Queue	First In First Out	☐	☒
17	Almacen Maq 8.Queue	First In First Out	☐	☒
18	Almacen Maq 9.Queue	First In First Out	☐	☒

Figura 65 Colas FIFO para los Holds

7. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN.

7.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presentarán los resultados obtenidos tras ejecutar las simulaciones correspondientes a los modelos explicados en el capítulo anterior, primero se expondrán los resultados de los modelos por lotes y en la siguiente sección los resultados de los modelos por lotes de transferencia unitaria, así como sus variantes.

Para resolver los modelos se ha utilizado el programa ARENA en su versión 7.01. Los Reports generados por ARENA se pueden consultar los anexos adjuntos a este trabajo.

El ordenador utilizado para procesar los modelos tiene un procesador Intel® Core™ I7-4770K CPU @ 3.50GHz.

7.2 MODELOS POR LOTES.

Los modelos por lotes o escenarios son:

- Modelo 1: Modelo por lotes, orden mayor prioridad, colas FIFO.
- Modelo 2: Modelo por lotes, orden mayor prioridad, colas LVA orden.
- Modelo 3: Modelo por lotes, orden menor tiempo total del lote con Set Up, colas FIFO.
- Modelo 4: Modelo por lotes, orden menor tiempo total del lote con Set Up, colas LVA orden.
- Modelo 5: Modelo por lotes, orden menor tiempo total del lote con Set Up, colas LVA tiempo en estación.

A continuación se exponen los resultados obtenidos tras resolver los modelos por lotes. Para la comparación de modelos se han seleccionados una serie de parámetros:

- Tiempo total de fabricación: Este valor determina el tiempo total necesario para fabricar todos los lotes.
- Tiempo de procesado medio: Es el tiempo medio que pasan los lotes dentro de las máquinas.
- Tiempo en espera medio: Es el tiempo medio que pasan los lotes esperando en las colas de las máquinas para ser procesados.
- Tiempo de ciclo medio: Es la media de tiempo desde que un lote entra en el sistema hasta que sale. El valor es el valor medio de lo que tardan los lotes en salir del sistema.
- Tiempo medio de espera cola X: Es el tiempo medio que pasan los lotes en la cola de la máquina X antes de ser procesado.
- % Utilización máquina X: Es el ratio del tiempo que la máquina está utilizándose y el tiempo total de simulación. Cuanto mayor sea el valor mayor tiempo habrá sido utilizada la máquina durante la simulación.

	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4	Modelo 5
Tiempo total de fabricación	2591	2591	2511	2511	2380
Tiempo de procesado medio	523,51	523,51	523,62	523,62	523,62
Tiempo en espera medio	481,62	478,77	347,07	305,59	261,92
Tiempo de ciclo medio	1005,1	1002,2	870,7	829,22	785,55
Tmp. Medio de espera cola 1	899,5	899,5	20	20	20
Tmp. Medio de espera cola 2	234,25	224,62	534,25	405,87	285
Tmp. Medio de espera cola 3	631,4	631,4	360	360	352,2
Tmp. Medio de espera cola 4	147	147	147	147	147
Tmp. Medio de espera cola 5	179,33	179,33	0	0	0
Tmp. Medio de espera cola 6	173,12	173,12	205,75	194,12	187,5
Tmp. Medio de espera cola 7	952,5	952,5	292,5	292,5	262,5
Tmp. Medio de espera cola 8	0	0	0	0	0
Tmp. Medio de espera cola 9	0	0	0	0	0
% Utilización Máq. 1	70,97	70,97	73,28	73,28	77,27
% Utilización Máq. 2	61,28	61,28	63,24	63,24	66,72
% Utilización Máq. 3	53,64	53,64	55,35	55,35	58,4
% Utilización Máq. 4	65,38	65,38	67,46	67,46	71,17
% Utilización Máq. 5	46,85	46,85	48,46	48,46	51,13
% Utilización Máq. 6	71,71	71,71	73,99	73,99	78,06
% Utilización Máq. 7	62,52	62,52	64,51	64,51	68,06
% Utilización Máq. 8	57,39	57,39	59,22	59,22	62,48
% Utilización Máq. 9	55,77	55,77	57,54	57,54	60,71

Tabla 12 Resultados, modelos por lotes

El tiempo total de fabricación, nos muestra cómo aplicando reglas de despacho de introducir primero aquellos lotes con menor tiempo total de fabricación, regla STPT, (modelos 3 y 4) mejora no solamente la suma del tiempo total de fabricación de todos los lotes sino también reduce el tiempo de espera medio de los lotes en las colas de las máquinas aumentando así el porcentaje de utilización de éstas. Entre los modelos 3 y 4 se observa que cambiando la reglas de secuenciación en las colas de FIFO a LVA (tiempo total del lote) se reduce el tiempo total de espera medio en las colas, así, los lotes que posean menor tiempo de procesado medio entran antes y salen antes del sistema, agilizando el sistema y evitando cuellos de botellas. Con respecto al modelo 5, se observa cómo la regla SPT mejora notablemente los porcentajes de utilización de las máquinas ya que reduce el tiempo que las piezas están esperando en las colas, al introducir primero aquellas piezas con un tiempo de proceso menor.

A continuación se muestran las tablas con el registro de salida de los lotes, la primera columna hace referencia al tipo de la pieza, la segunda al orden de entrada al sistema, la tercera al número de piezas de las que se compone el lote y en la última columna el minuto exacto en el que sale del sistema.

Modelo lotes prioridad FIFO				Modelo lotes prioridad LVA (Orden)				Modelo lotes tiempo total lote FIFO			
Tipo	Orden	Demanda	Mnt Salida	Tipo	Orden	Demanda	Mnt Salida	Tipo	Orden	Demanda	Mnt Salida
5	2	10	107	5	2	10	107	17	1	3	36
17	12	2	110	17	12	2	110	1	2	1	40
18	9	10	160	18	9	10	160	3	3	6	71
9	3	10	174	9	3	10	174	5	4	10	107
17	10	3	196	17	10	3	196	17	5	2	113
3	7	6	245	3	7	6	245	15	6	8	164
6	18	11	334	6	18	11	334	9	10	10	245
2	1	35	426	2	1	35	426	7	7	10	294
7	24	10	514	7	24	10	514	6	13	11	334
15	26	8	642	15	26	8	642	18	8	10	454
16	11	12	706	16	11	12	706	14	14	13	509
4	13	10	831	4	13	10	831	4	15	10	568
3	8	44	885	3	8	44	885	11	9	3	737
14	22	13	970	12	21	14	893	16	17	12	970
11	15	3	1001	11	15	3	1001	2	16	35	994
12	21	14	1157	14	22	13	1157	13	11	7	1094
8	16	21	1287	8	16	21	1287	8	21	15	1173
11	14	25	1487	11	14	25	1487	8	12	21	1224
10	25	30	1576	10	25	30	1576	11	20	25	1401
14	23	23	1694	14	23	23	1694	10	19	30	1576
13	20	7	1744	13	20	7	1744	12	18	14	1588
9	4	46	1799	9	4	46	1799	3	22	44	1620
1	5	1	1839	1	5	1	1839	14	23	23	1694
6	19	39	2153	6	19	39	2153	9	24	46	1839
1	6	30	2511	1	6	30	2511	6	25	39	2153
8	17	15	2591	8	17	15	2591	1	26	30	2511

Tabla 13 Registro de salida de lotes modelos 1, 2 y 3

Modelo lotes tiempo total lote LVA (Orden)				Modelo lotes tiempo total lote LVA (T proceso)			
Tipo	Orden	Demanda	Mnt Salida	Tipo	Orden	Demanda	Mnt Salida
17	1	3	36	17	1	3	36
1	2	1	40	1	2	1	40
3	3	6	71	3	3	6	71
5	4	10	107	5	4	10	107
17	5	2	113	17	5	2	113
15	6	8	164	15	6	8	164
9	10	10	245	13	11	7	195
7	7	10	294	11	9	3	259
6	13	11	334	8	12	21	325
13	11	7	369	6	13	11	334
18	8	10	454	7	7	10	389
8	12	21	499	9	10	10	499
11	9	3	549	18	8	10	549
4	15	10	568	8	21	15	748
14	14	13	763	14	14	13	763
2	16	35	994	10	19	30	923
8	21	15	1173	11	20	25	940
16	17	12	1224	4	15	10	964
12	18	14	1411	12	18	14	1127
10	19	30	1576	2	16	35	1390
11	20	25	1588	16	17	12	1588
3	22	44	1620	3	22	44	1620
14	23	23	1694	14	23	23	1694
9	24	46	1839	9	24	46	1839
6	25	39	2153	6	25	39	2153
1	26	30	2511	1	26	30	2380

Tabla 14 Registro de salida de lotes modelos 4 y 5

7.3 MODELOS POR LOTES DE TRANSFERENCIA UNITARIA.

Los modelos por lotes o escenarios son:

- Modelo 1: Modelo por lotes de transferencia unitaria, orden mayor prioridad, colas LVA orden.
- Modelo 2: Modelo por lotes de transferencia unitaria, orden mayor prioridad, colas LVA tiempo en estación.
- Modelo 3: Modelo por lotes de transferencia unitaria, orden mayor prioridad, colas FIFO.

En los modelos por lotes de transferencia unitaria se ha analizado también el tiempo de espera en almacén, ya que como se vio en el capítulo anterior los almacenes retienen a las piezas de distinto tipo, hasta que todas las piezas del tipo que se están procesando terminen.

En los tres modelos la secuencia de los lotes se ha hecho según la prioridad, tras lo cual las reglas de despacho aplicadas a las colas de los almacenes han mostrado que empleando LVA según en tiempo de estación (modelo 2) y regla FIFO (Modelo 3) proporcionan excelentes resultados. La regla LVA para tiempo de estación (modelo 2), es decir, entran primero las piezas que posean menor tiempo de procesado en la estación, aporta los mejores resultados a la hora de reducir el tiempo en espera medio y el tiempo de ciclo medio, como cabía de esperar de la regla SPT. En cuanto al modelo 3, una regla FIFO ha resultado ser la mejor opción de todas, pese a que empeora los tiempos de espera medio y tiempo de ciclo medio, esto se explica porque al entrar en la máquina las piezas sin necesidad de buscar cual es más prioritaria o con menor tiempo de procesado aumenta la “agilidad” del sistema y la utilización de la máquina.

	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
Tiempo total de fabricación	2233	1946	1942
Tiempo de procesamiento medio	30,38	30,39	30,38
Tiempo en espera medio	845,84	697,47	760,76
Tiempo de ciclo medio	879,22	727,86	791,15
Tmp. Medio de espera cola 1	863,61	863,61	863,61
Tmp. Medio de espera cola 2	75,17	100,66	137,1
Tmp. Medio de espera cola 3	161,8	161,8	161,8
Tmp. Medio de espera cola 4	379	379	379
Tmp. Medio de espera cola 5	50,55	50,01	50,55
Tmp. Medio de espera cola 6	76,27	130,4	118,41
Tmp. Medio de espera cola 7	290,49	290,49	290,49
Tmp. Medio de espera cola 8	726,87	726,87	726,87
Tmp. Medio de espera cola 9	700,83	700,83	700,83
Tmp. Medio de espera alm 1	62,03	58,03	54,51
Tmp. Medio de espera alm 2	75,35	55,27	59,83
Tmp. Medio de espera alm 3	77,43	47,79	56,85
Tmp. Medio de espera alm 4	59,45	51,5	51,5
Tmp. Medio de espera alm 5	23,6	18,93	24,24
Tmp. Medio de espera alm 6	56,25	46,58	50,53
Tmp. Medio de espera alm 7	84,52	55,56	60,94
Tmp. Medio de espera alm 8	0	0	0
Tmp. Medio de espera alm 9	0	0	0
% Utilización Máq. 1	82,35	94,5	94,7
% Utilización Máq. 2	71,11	81,6	81,77
% Utilización Máq. 3	62,25	71,42	71,57
% Utilización Máq. 4	75,86	87,05	87,23
% Utilización Máq. 5	54,36	62,38	62,51
% Utilización Máq. 6	82,94	95,47	95,36
% Utilización Máq. 7	72,55	83,24	83,42
% Utilización Máq. 8	66,59	76,41	76,57
% Utilización Máq. 9	64,71	74,25	74,4

Tabla 15 Resultados, modelos por lotes de transferencia unitaria

En el anexo se adjuntan las tablas que registran el instante en que cada pieza sale del sistema una vez fabricada.

7.4 COMPARATIVA MODELOS.

Una vez visto los resultados de los modelos podemos corroborar que una desagregación de lotes en piezas supone una mejora significativa en todos los parámetros medidos, tal como la teoría sostiene.

A continuación podemos observar en este gráfico cómo el uso de la transferencia unitaria aumenta la utilización de las máquinas, en algunos casos, este aumento supone un incremento de un +25% con respecto a los modelos por lotes. Esto se debe a que los modelos por transferencia unitaria reducen el tiempo total de fabricación con lo que las máquinas se encuentran más tiempo en funcionamiento.

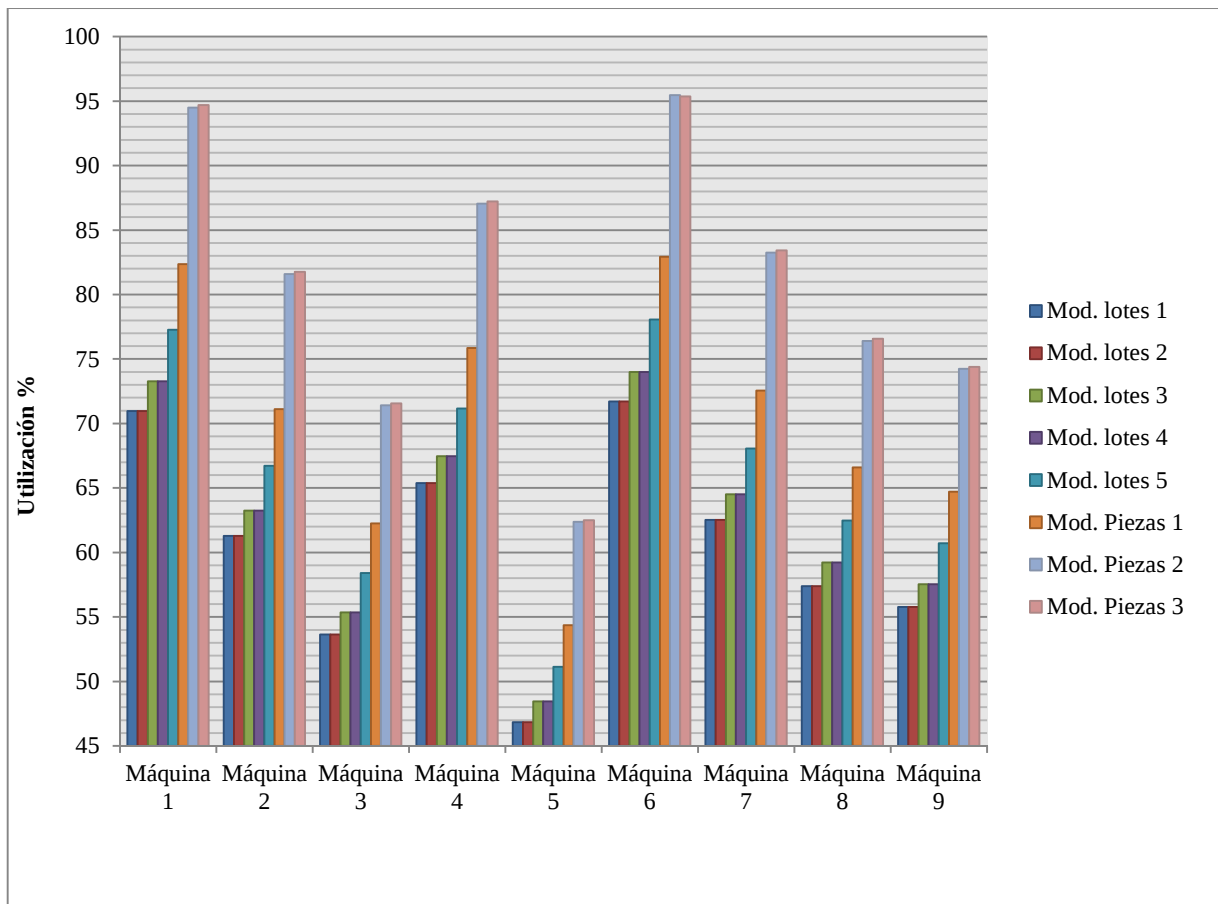


Gráfico 1 Utilización de las máquinas %

En el siguiente gráfico se observa cómo el tiempo total de fabricación se reduce significativamente en los modelos de transferencia unitario. Así la diferencia entre los tiempos totales de fabricación supone aproximadamente 10 horas, con lo que se puede reducir un turno el trabajo de la fábrica.

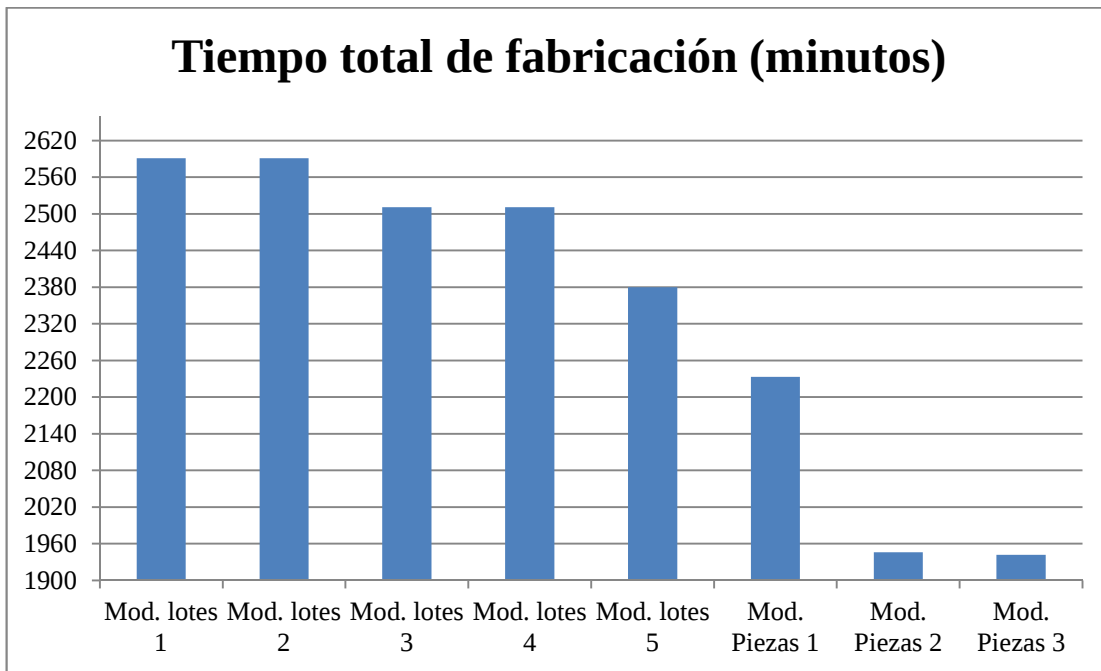


Gráfico 2 Tiempo total de fabricación (minutos)

A continuación, centrándose en el tiempo de espera medio en los modelos por lotes, se puede apreciar una reducción considerable. Se aprecia que la aplicación de la regla LVA para el tiempo de procesado en estación aporta los mejores resultados (modelo 5).

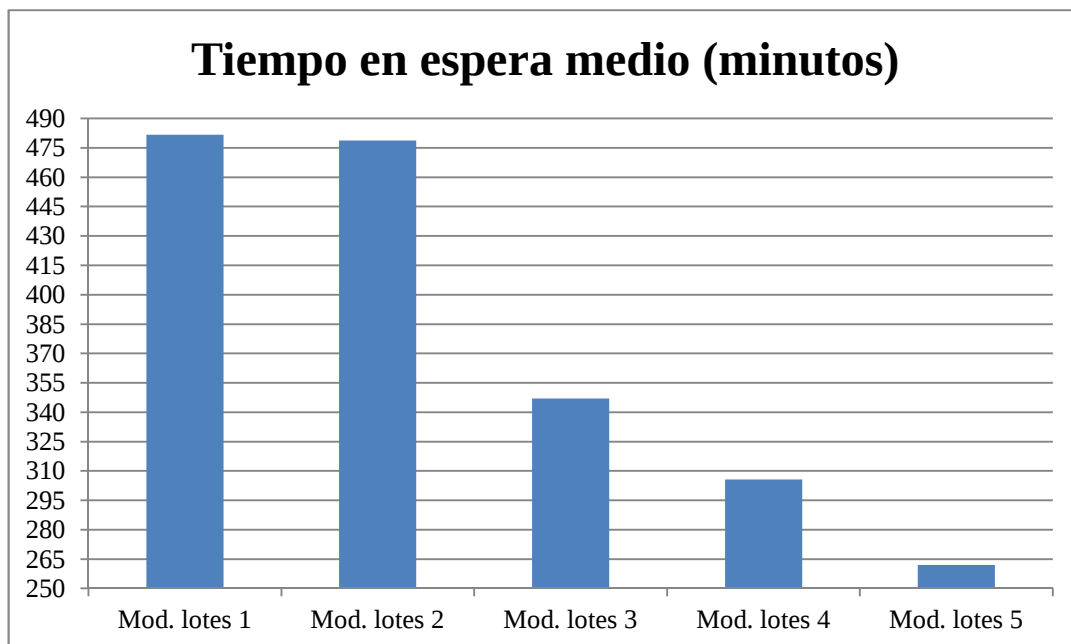


Gráfico 3 Tiempo en espera medio (minutos) Modelos por lotes

Con respecto al tiempo de ciclo medio en los modelos por lotes también se aprecia una notable mejoría al aplicar reglas de despacho relacionadas con el tiempo en estación (modelo 5)

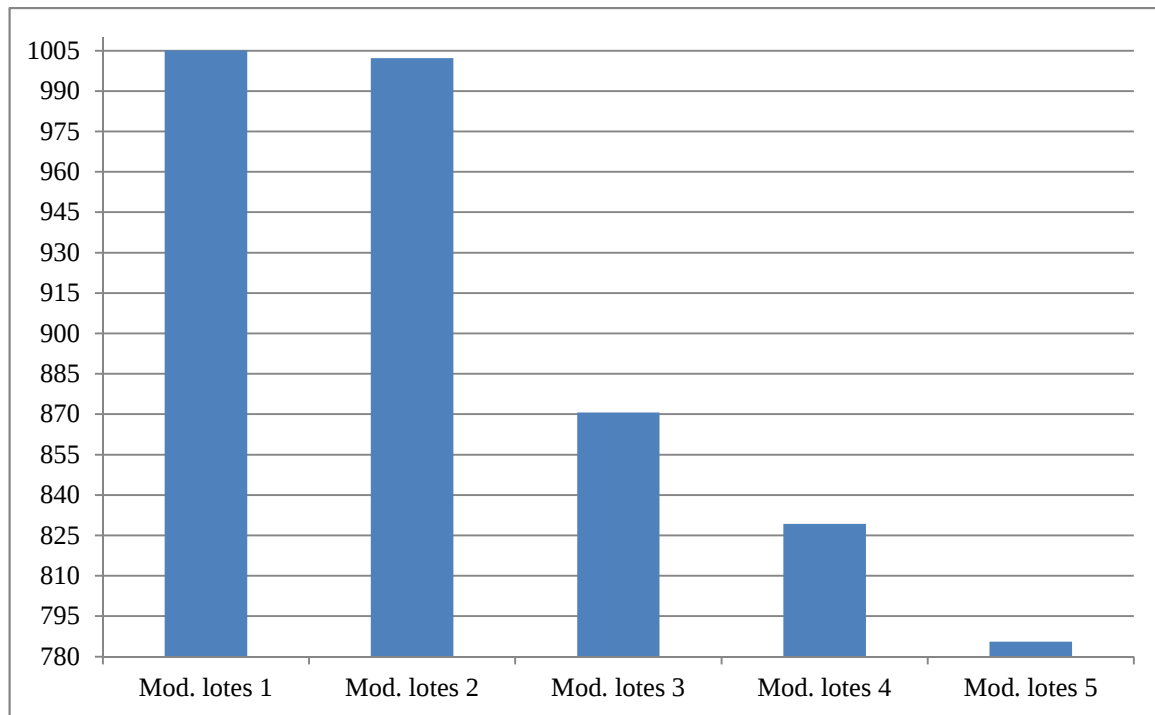


Gráfico 4 Tiempo de ciclo medio (minutos) Modelos por lotes

Respectivamente al comparar los modelos de transferencia unitaria se observa que el último modelo (modelo 3) aun obteniendo un tiempo de ciclo total menor empeora con respecto a otros parámetros como el tiempo en espera medio y el tiempo medio de ciclo, así que el modelo 2 de transferencia unitaria supone la mejor opción de entre todos los modelos propuestos.

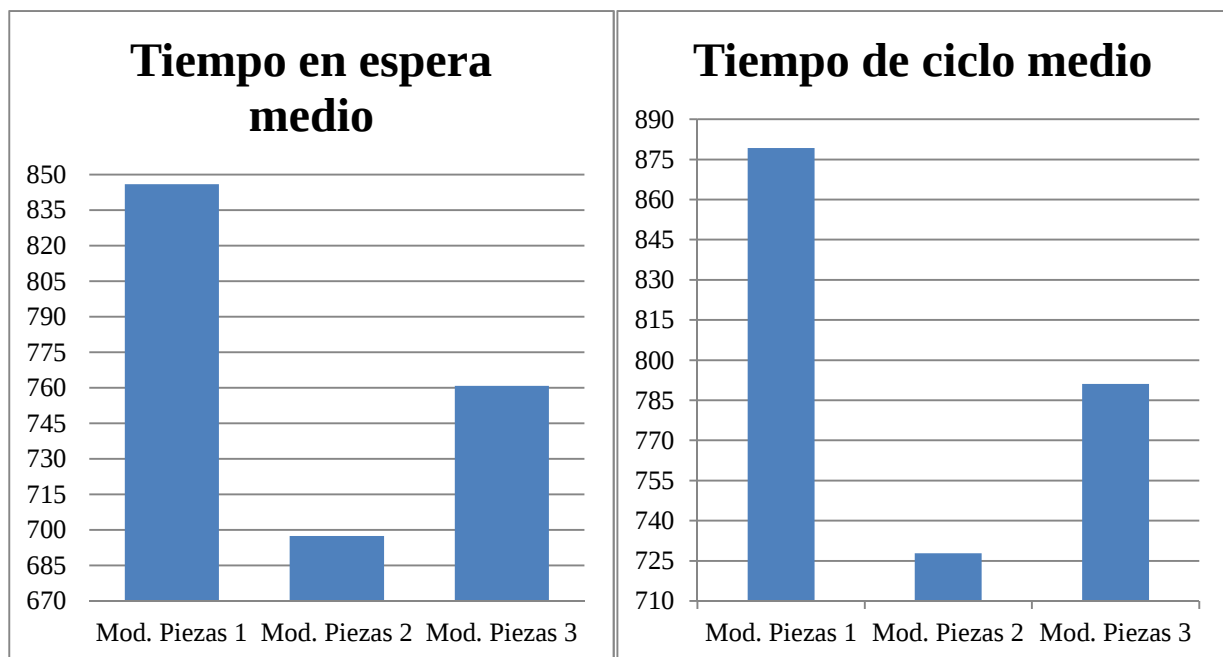


Gráfico 5 Tiempo en espera medio Modelos por piezas

Gráfico 6 Tiempo de ciclo medio Modelos por piezas

8. CONCLUSIONES

8.1 CONCLUSIONES

Competitividad, esta palabra se ha convertido en la principal misión de todas las organizaciones hoy día. Cada empresa se ha enfocado según unas estrategias diferentes, unas compiten en precio, otras en calidad y otras en rapidez. A pesar de estas diferencias todas comparten un concepto común, la optimización, en muchas compañías utilizan esta palabra para designar a cualquier tipo de mejora. No obstante, la optimización no es una simple mejora, consiste en encontrar la mejor solución de todas las posibles, la solución global.

En la búsqueda de la optimización se han aplicado múltiples y diferentes métodos y disciplinas, la programación matemática he demostrado ser la más eficaz herramienta para la persecución de este objetivo, a pesar de esto, en las empresas esta metodología se descarta habitualmente debido a la complejidad asociada de modelar un sistema real y a la cantidad de tiempo para su resolución. De este modo, las compañías optan a menudo por un enfoque de prueba y error o utilizando programas de hojas de cálculo.

A lo largo de este trabajo se han mostrado las ventajas de la simulación para buscar la competitividad en la empresa, más en concreto la mejora de tiempos. Se han explicado distintos estudios centrados en mejorar los tiempos con la ayuda de la programación matemática obteniendo sin duda excelentes resultados, pero es en la simulación en donde la relación entre la mejora obtenida y el tiempo empleado supone una atractiva herramienta disponible. En consecuencia, aplicando la simulación se ha conseguido reducir el tiempo total de fabricación de todos los pedidos en más de 10 horas desde el primer modelo hasta el último. Mejorando también el porcentaje de utilización de algunas de las máquinas en hasta un +25%. Así aplicando apenas unas simples reglas de despacho se pueden obtener unas mejoras increíbles.

A diferencia de la programación matemática, las simulaciones realizadas apenas tardan segundos en realizarse aportando datos útiles a la hora de implementar los resultados en el sistema real, como se ha visto los modelos explican detalladamente en qué instante de tiempo saldrá un pedido del sistema pudiendo así comprometerse con el cliente para ofrecerle una fecha exacta con las máximas garantías.

Estos modelos podrán servir al gestor de la fábrica para estudiar en apenas unos segundos el impacto que supondría variaciones en la demanda, incorporación de nuevos productos, cambios de rutas entre las máquinas, cambios en las prioridades de los productos, etc. Esta es sin duda la principal ventaja de la simulación, rapidez y solidez en los resultados. Huelga decir que la programación matemática puede ofrecer óptimos globales a los mismos problemas a los que se enfrenta la simulación mejorando en la mayoría de los casos los resultados de la simulación, pero la simulación no busca el óptimo global sólo busca mejorar la situación y probar distintos escenarios rápidamente.

8.2 LÍNEAS FUTURAS DE TRABAJO.

Los modelos actuales suponen entornos aislados de simulación, esto es, no están conectados con el sistema informático de la empresa, sería ventajoso poder enlazar la información nueva de pedidos con los modelos de simulación a fin de obtener rápidamente un programa de trabajo mejorada con los nuevos encargos de manera rápida, así en apenas unos segundos se podría conseguir un plan de producción en el que se estableciera el orden de los pedidos y las fechas de entregas de estos. A través de una interfaz gráfica se podría introducir y leer los datos de manera sencilla a fin de organizar los resultados, después de la simulación, en vez de buscar los datos en diferentes ficheros de texto.

Uno de los puntos que se podrían estudiar sería la incorporación de máquinas automatizadas que agrupen los pedidos por familias de piezas a fin de utilizar las mismas herramientas y así reducir o eliminar los tiempos de Set Up en las estaciones.

También sería interesante un estudio en profundidad de las piezas y sus posibles métodos de fabricación para conseguir nuevas rutas de fabricación que pudieran ser más eficientes, consumiendo menos tiempo y liberando máquinas más cargadas por otras más ociosas.

Otra posible línea de trabajo sería la estandarización en la forma de recepción de pedidos por parte de los clientes, de modo que el canal y el método de entrada sea el mismo, lo que evitaría un trabajo complementario al reprocesar dicha información para introducirla en un formato común. Se podría crear un programa que a través de una interfaz gráfica facilite el encargo de pedidos por parte de los clientes, evitando también la información errónea.

Una posible línea de investigación podría ser el desarrollo de un programa de secuenciación a través de programación matemática para los trabajos en las máquinas, dado un horizonte de trabajo. A modo de buscar un óptimo a tal problema.

9. REFERENCIAS.

9.1 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

TFM. Arturo Romo de Vivar Reta. (2015) Modelado y resolución de problemas de carga de máquinas en talleres con rutas alternativas. Aplicación a una empresa de fabricación de electrodos

Chapman, S. N. (2006). The fundamentals of production planning and control. Pearson Education, Inc.

Chase, R. B., & Aquilano, N. J. (1994). Dirección y administración de la producción y las operaciones, 6ª ed. (E. M. Peake, Trans.) Wilmington, Delaware, Estados Unidos: Adison Wesley Iberoamericana.

Chase, R. B., Aquilano, N. J. & Jacobs, F. R. (2001) Operations Management for Competitive Advantage. Ninth Edition. McGraw-Hill Irwin.

Company's, R., & Corominas, A. (1993). Planificación de la capacidad productiva. Organización de la Producción I, Diseño de sistemas de producción.(Vol. 1). Barcelona, España: Universidad Politécnica de Catalunya.

Cuatrecasas, L. (2000). Organización de la producción y dirección de operaciones. Sistemas actuales de gestión eficiente y competitiva. Madrid, Madrid, España: Centro de Estudios Ramón Areces S.A.

Denizel, M., & Sayin, S. (1998). Part-Type selection in flexible manufacturing systems: a bicriteria approach with due dates. Journal of Operational Research Society, 49, 659-669.

Domínguez Machuca, J. A. (1995). Dirección de Operaciones: Aspectos tácticos y operativos en la producción y los servicios. (M. J. Norte, Ed.) Madrid, España: McGraw Hill/Interamericana de España S.A.U.

Domínguez Machuca, J. A., Álvarez, M. J., Domínguez, M. Á., García, S., & Ruiz, A. (1998). "Dirección de Operaciones". Aspectos estratégicos de la producción y servicios. Madrid, España: McGraw-Hill.

Eguía Salinas, I. (1996). Programación y control de la producción en procesos semicontinuos, métodos y algoritmos de resolución. Sevilla, España.

Eguía, I. & Racero, J (2015). Introducción a la Simulación & Simulación de Eventos Discretos. Herramientas de modelado. Sevilla, España.

Finch, B. (2006) Operations Now: Profitability, Processes, Performance. Boston: McGraw-Hill Irwin.

Giachino, J. & Weeks, W. (1981). Técnica y práctica para la soldadura. Barcelona: Reverté S.A.

González, M. A, Vela, C. R & Varela, R. (2015). Scatter search with path relinking for the flexible job shop scheduling problem. European Journal of Operational Research 245 (2015) 35–45.

Hayes, R. H. & Wheelwright, S. C. (1984). Restoring Our Competitive Edge: Competing Through Manufacturing. New York: John Wiley.

- Heizer, J. & Render, B. (2007) Dirección de la producción y de operaciones. Decisiones estratégicas, 8ª ed. Pearson Education, Inc.
- Hernández. J.C. y Vizán A. (2013) "Lean Manufacturing. Concepto, técnicas e implantación". Fundación Eoi.
- Kaban, A. K, Othman, Z. & Rohmah, D. S. (2012). Comparison of dispatching rules in Job-Shop scheduling problem using simulation.
- Kuhn, H. (1995). A Heuristic Algorithm for the Loading Problem in Manufacturing Systems. The International Journal of Flexible Manufacturing Systems, 7, 229-254.
- Kumar, P., Singh, N., Tiwari, M., & Shankar, R. (1987). Multicriterion analysis of the loading problem in flexible manufacturing systems using a Min-Max approach. The international Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2(2), 13-20.
- Mahapatra, S., & Biswas, S. (2007). Machine Loading in Flexible Manufacturing System: A Swarm Optimization Approach. Eight International Conference on Oper. & Quant. Management, (pp. 621-628).
- Mahmudy, W., Lee H., L. S., & Romeo, M. M. (2013). Modeling and Optimization of Part Type Selection and Loading Problem in Flexible Manufacturing System Usin Real Code Genetic Algorithms. International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering, 7(4), 251-260.
- Pinedo, M. (1995). "Scheduling". Theory, Algorithms and Systems. New Jersey: Pentice-Hall.
- Ponnambalam, S., & Kiat, L. (2008). Solving Machine Loading Problem in Flexible Manufacturing Systems Using Particle Swarm Optimization. World Academy of Science, Engineering and Technology, 14-19.
- Powell, N. (1970). Production Planning, Scheduling, and Inventory Control. A Text and Cases (Vol. First Edition). Toronto, Canada: The MacMilland Company.
- Seok Shin, K., Park, J., & Keun Kim, Y. (2011). Multiobjective FMS Process Planning with various Flexibilities Using a Symbiotic Evolutionary Algorithm. Computers and Operations Research, 26(4), 702-712.
- Shanker, K., & Srinivasulu, A. (1989). Some solutions methodologies for loading problems in flexible manufacturing systems. International Journal of Production Research, 1019-1034.
- Stecke, K. (1983). Formulation and solution of non-linear integer production planning problem for flexible manufacturing system. Management Science, 29(3), 273-288.
- Tiwari, M., Kumar, S., & Bardhan, R. (2010). Operation allocation and part type selection in E-Manufacturing: An Auction Based Heuristics Supported by Agent Technology. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 312-324.
- Vollmann, Thomas E., William L. Berry, D. Clay Whybark, & F. Robert Jacobs, F. R. (2005) Manufacturing Planning and Control for Supply Chain Management. 5th ed. Boston: McGraw-Hill Irwin.

ANEXOS

ANEXO 1. Report Modelo por lotes, orden mayor prioridad, colas FIFO.

ARENA Simulation Results
Luis de Lara - License: STUDENT

Summary for Replication 1 of 1

Project: Modelo por lotes, orden mayor prioridad, colas FIFO.
Analyst: Luis de Lara

Replication ended at time : 2591.0 Minutes
Base Time Units: Minutes

TALLY VARIABLES

Identifier	Average	Half Width	Minimum	Maximum	Observations
Inicio.VATime	523.51	(Insuf)	.00000	2380.0	27
Inicio.NVATime	.00000	(Insuf)	.00000	.00000	27
Inicio.WaitTime	481.62	(Insuf)	.00000	1848.0	27
Inicio.TranTime	.00000	(Insuf)	.00000	.00000	27
Inicio.OtherTime	.00000	(Insuf)	.00000	.00000	27
Inicio.TotalTime	1005.1	(Insuf)	.00000	2591.0	27
Celula 2.Queue.WaitingTime	234.25	(Insuf)	.00000	706.00	8
Celula 7.Queue.WaitingTime	952.50	(Insuf)	.00000	1615.0	4
Celula 3.Queue.WaitingTime	631.40	(Insuf)	.00000	994.00	5
Celula 8.Queue.WaitingTime	.00000	(Insuf)	.00000	.00000	1
Celula 9.Queue.WaitingTime	.00000	(Insuf)	.00000	.00000	1
Celula 4.Queue.WaitingTime	147.00	(Insuf)	.00000	334.00	3
Celula 5.Queue.WaitingTime	179.33	(Insuf)	.00000	538.00	3
Celula 6.Queue.WaitingTime	173.12	(Insuf)	.00000	514.00	8
Celula 1.Queue.WaitingTime	899.50	(Insuf)	.00000	1799.0	2

DISCRETE-CHANGE VARIABLES

Identifier	Average	Half Width	Minimum	Maximum	Final Value
Inicio.WIP	10.474	(Insuf)	.00000	27.000	.00000
Maquina 1.NumberBusy	.70976	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 1.NumberScheduled	1.0000	(Insuf)	1.0000	1.0000	1.0000
Maquina 1.Utilization	.70976	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 2.NumberBusy	.61289	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 2.NumberScheduled	1.0000	(Insuf)	1.0000	1.0000	1.0000
Maquina 2.Utilization	.61289	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 3.NumberBusy	.53647	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 3.NumberScheduled	1.0000	(Insuf)	1.0000	1.0000	1.0000
Maquina 3.Utilization	.53647	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 4.NumberBusy	.65380	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 4.NumberScheduled	1.0000	(Insuf)	1.0000	1.0000	1.0000
Maquina 4.Utilization	.65380	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 5.NumberBusy	.46854	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 5.NumberScheduled	1.0000	(Insuf)	1.0000	1.0000	1.0000

Maquina 5.Utilization	.46854	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 6.NumberBusy	.71710	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 6.NumberScheduled	1.0000	(Insuf)	1.0000	1.0000	1.0000
Maquina 6.Utilization	.71710	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 7.NumberBusy	.62524	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 7.NumberScheduled	1.0000	(Insuf)	1.0000	1.0000	1.0000
Maquina 7.Utilization	.62524	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 8.NumberBusy	.57391	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 8.NumberScheduled	1.0000	(Insuf)	1.0000	1.0000	1.0000
Maquina 8.Utilization	.57391	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 9.NumberBusy	.55770	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 9.NumberScheduled	1.0000	(Insuf)	1.0000	1.0000	1.0000
Maquina 9.Utilization	.55770	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Celula 2.Queue.NumberInQueue	.72327	(Insuf)	.00000	3.0000	.00000
Celula 7.Queue.NumberInQueue	1.4704	(Insuf)	.00000	3.0000	.00000
Celula 3.Queue.NumberInQueue	1.2184	(Insuf)	.00000	4.0000	.00000
Celula 8.Queue.NumberInQueue	.00000	(Insuf)	.00000	.00000	.00000
Celula 9.Queue.NumberInQueue	.00000	(Insuf)	.00000	.00000	.00000
Celula 4.Queue.NumberInQueue	.17020	(Insuf)	.00000	2.0000	.00000
Celula 5.Queue.NumberInQueue	.20764	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Celula 6.Queue.NumberInQueue	.53454	(Insuf)	.00000	4.0000	.00000
Celula 1.Queue.NumberInQueue	.69433	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000

OUTPUTS

Identifier	Value
Inicio.NumberIn	27.000
Inicio.NumberOut	27.000
Maquina 1.NumberSeized	2.0000
Maquina 1.ScheduledUtilization	.70976
Maquina 2.NumberSeized	8.0000
Maquina 2.ScheduledUtilization	.61289
Maquina 3.NumberSeized	5.0000
Maquina 3.ScheduledUtilization	.53647
Maquina 4.NumberSeized	3.0000
Maquina 4.ScheduledUtilization	.65380
Maquina 5.NumberSeized	3.0000
Maquina 5.ScheduledUtilization	.46854
Maquina 6.NumberSeized	8.0000
Maquina 6.ScheduledUtilization	.71710
Maquina 7.NumberSeized	4.0000
Maquina 7.ScheduledUtilization	.62524
Maquina 8.NumberSeized	1.0000
Maquina 8.ScheduledUtilization	.57391
Maquina 9.NumberSeized	1.0000
Maquina 9.ScheduledUtilization	.55770
System.NumberOut	27.000

Simulation run time: 0.00 minutes.

Simulation run complete.

ANEXO 2. Modelo por lotes, orden mayor prioridad, colas LVA orden

ARENA Simulation Results
Luis de Lara - License: STUDENT

Summary for Replication 1 of 1

Project: Modelo por lotes, orden mayor prioridad, colas LVA orden.
Analyst: Luis de Lara

Replication ended at time : 2591.0 Minutes
Base Time Units: Minutes

TALLY VARIABLES

Identifier	Average	Half Width	Minimum	Maximum	Observations
Inicio.VATime	523.51	(Insuf)	.00000	2380.0	27
Inicio.NVATime	.00000	(Insuf)	.00000	.00000	27
Inicio.WaitTime	478.77	(Insuf)	.00000	1848.0	27
Inicio.TranTime	.00000	(Insuf)	.00000	.00000	27
Inicio.OtherTime	.00000	(Insuf)	.00000	.00000	27
Inicio.TotalTime	1002.2	(Insuf)	.00000	2591.0	27
Celula 2.Queue.WaitingTime	224.62	(Insuf)	.00000	893.00	8
Celula 7.Queue.WaitingTime	952.50	(Insuf)	.00000	1615.0	4
Celula 3.Queue.WaitingTime	631.40	(Insuf)	.00000	994.00	5
Celula 8.Queue.WaitingTime	.00000	(Insuf)	.00000	.00000	1
Celula 9.Queue.WaitingTime	.00000	(Insuf)	.00000	.00000	1
Celula 4.Queue.WaitingTime	147.00	(Insuf)	.00000	334.00	3
Celula 5.Queue.WaitingTime	179.33	(Insuf)	.00000	538.00	3
Celula 6.Queue.WaitingTime	173.12	(Insuf)	.00000	514.00	8
Celula 1.Queue.WaitingTime	899.50	(Insuf)	.00000	1799.0	2

DISCRETE-CHANGE VARIABLES

Identifier	Average	Half Width	Minimum	Maximum	Final Value
Inicio.WIP	10.444	(Insuf)	.00000	27.000	.00000
Maquina 1.NumberBusy	.70976	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 1.NumberScheduled	1.0000	(Insuf)	1.0000	1.0000	1.0000
Maquina 1.Utilization	.70976	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 2.NumberBusy	.61289	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 2.NumberScheduled	1.0000	(Insuf)	1.0000	1.0000	1.0000
Maquina 2.Utilization	.61289	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 3.NumberBusy	.53647	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 3.NumberScheduled	1.0000	(Insuf)	1.0000	1.0000	1.0000
Maquina 3.Utilization	.53647	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 4.NumberBusy	.65380	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 4.NumberScheduled	1.0000	(Insuf)	1.0000	1.0000	1.0000
Maquina 4.Utilization	.65380	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 5.NumberBusy	.46854	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 5.NumberScheduled	1.0000	(Insuf)	1.0000	1.0000	1.0000
Maquina 5.Utilization	.46854	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 6.NumberBusy	.71710	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 6.NumberScheduled	1.0000	(Insuf)	1.0000	1.0000	1.0000
Maquina 6.Utilization	.71710	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000

Maquina 7.NumberBusy	.62524	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 7.NumberScheduled	1.0000	(Insuf)	1.0000	1.0000	1.0000
Maquina 7.Utilization	.62524	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 8.NumberBusy	.57391	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 8.NumberScheduled	1.0000	(Insuf)	1.0000	1.0000	1.0000
Maquina 8.Utilization	.57391	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 9.NumberBusy	.55770	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 9.NumberScheduled	1.0000	(Insuf)	1.0000	1.0000	1.0000
Maquina 9.Utilization	.55770	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Celula 2.Queue.NumberInQueue	.69355	(Insuf)	.00000	3.0000	.00000
Celula 7.Queue.NumberInQueue	1.4704	(Insuf)	.00000	3.0000	.00000
Celula 3.Queue.NumberInQueue	1.2184	(Insuf)	.00000	4.0000	.00000
Celula 8.Queue.NumberInQueue	.00000	(Insuf)	.00000	.00000	.00000
Celula 9.Queue.NumberInQueue	.00000	(Insuf)	.00000	.00000	.00000
Celula 4.Queue.NumberInQueue	.17020	(Insuf)	.00000	2.0000	.00000
Celula 5.Queue.NumberInQueue	.20764	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Celula 6.Queue.NumberInQueue	.53454	(Insuf)	.00000	4.0000	.00000
Celula 1.Queue.NumberInQueue	.69433	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000

OUTPUTS

Identifier	Value
Inicio.NumberIn	27.000
Inicio.NumberOut	27.000
Maquina 1.NumberSeized	2.0000
Maquina 1.ScheduledUtilization	.70976
Maquina 2.NumberSeized	8.0000
Maquina 2.ScheduledUtilization	.61289
Maquina 3.NumberSeized	5.0000
Maquina 3.ScheduledUtilization	.53647
Maquina 4.NumberSeized	3.0000
Maquina 4.ScheduledUtilization	.65380
Maquina 5.NumberSeized	3.0000
Maquina 5.ScheduledUtilization	.46854
Maquina 6.NumberSeized	8.0000
Maquina 6.ScheduledUtilization	.71710
Maquina 7.NumberSeized	4.0000
Maquina 7.ScheduledUtilization	.62524
Maquina 8.NumberSeized	1.0000
Maquina 8.ScheduledUtilization	.57391
Maquina 9.NumberSeized	1.0000
Maquina 9.ScheduledUtilization	.55770
System.NumberOut	27.000

Simulation run time: 0.00 minutes.

Simulation run complete.

ANEXO 3. Report Modelo por lotes, orden menor tiempo total del lote con Set Up, colas FIFO.

ARENA Simulation Results
Luis de Lara - License: STUDENT

Summary for Replication 1 of 1

Project: Modelo por lotes, orden menor tiempo total del lote con Set Up, colas FIFO.

Analyst: Luis de Lara

Replication ended at time : 2511.0 Minutes

Base Time Units: Minutes

TALLY VARIABLES

Identifier	Average	Half Width	Minimum	Maximum	Observations
Inicio.VATime	523.62	(Insuf)	.00000	2380.0	27
Inicio.NVATime	.00000	(Insuf)	.00000	.00000	27
Inicio.WaitTime	347.07	(Insuf)	.00000	1213.0	27
Inicio.TranTime	.00000	(Insuf)	.00000	.00000	27
Inicio.OtherTime	.00000	(Insuf)	.00000	.00000	27
Inicio.TotalTime	870.70	(Insuf)	.00000	2511.0	27
Celula 2.Queue.WaitingTime	534.25	(Insuf)	.00000	965.00	8
Celula 7.Queue.WaitingTime	292.50	(Insuf)	.00000	735.00	4
Celula 3.Queue.WaitingTime	360.00	(Insuf)	.00000	994.00	5
Celula 8.Queue.WaitingTime	.00000	(Insuf)	.00000	.00000	1
Celula 9.Queue.WaitingTime	.00000	(Insuf)	.00000	.00000	1
Celula 4.Queue.WaitingTime	147.00	(Insuf)	.00000	334.00	3
Celula 5.Queue.WaitingTime	.00000	(Insuf)	.00000	.00000	3
Celula 6.Queue.WaitingTime	205.75	(Insuf)	.00000	567.00	8
Celula 1.Queue.WaitingTime	20.000	(Insuf)	.00000	40.000	2

DISCRETE-CHANGE VARIABLES

Identifier	Average	Half Width	Minimum	Maximum	Final Value
Inicio.WIP	9.3624	(Insuf)	.00000	27.000	.00000
Maquina 1.NumberBusy	.73238	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 1.NumberScheduled	1.0000	(Insuf)	1.0000	1.0000	1.0000
Maquina 1.Utilization	.73238	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 2.NumberBusy	.63242	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 2.NumberScheduled	1.0000	(Insuf)	1.0000	1.0000	1.0000
Maquina 2.Utilization	.63242	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 3.NumberBusy	.55356	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 3.NumberScheduled	1.0000	(Insuf)	1.0000	1.0000	1.0000
Maquina 3.Utilization	.55356	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 4.NumberBusy	.67463	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 4.NumberScheduled	1.0000	(Insuf)	1.0000	1.0000	1.0000
Maquina 4.Utilization	.67463	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 5.NumberBusy	.48467	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 5.NumberScheduled	1.0000	(Insuf)	1.0000	1.0000	1.0000
Maquina 5.Utilization	.48467	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 6.NumberBusy	.73994	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000

Maquina 6.NumberScheduled	1.0000	(Insuf)	1.0000	1.0000	1.0000
Maquina 6.Utilization	.73994	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 7.NumberBusy	.64516	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 7.NumberScheduled	1.0000	(Insuf)	1.0000	1.0000	1.0000
Maquina 7.Utilization	.64516	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 8.NumberBusy	.59219	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 8.NumberScheduled	1.0000	(Insuf)	1.0000	1.0000	1.0000
Maquina 8.Utilization	.59219	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 9.NumberBusy	.57547	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 9.NumberScheduled	1.0000	(Insuf)	1.0000	1.0000	1.0000
Maquina 9.Utilization	.57547	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Celula 2.Queue.NumberInQueue	1.7021	(Insuf)	.00000	4.0000	.00000
Celula 7.Queue.NumberInQueue	.46595	(Insuf)	.00000	3.0000	.00000
Celula 3.Queue.NumberInQueue	.71685	(Insuf)	.00000	4.0000	.00000
Celula 8.Queue.NumberInQueue	.00000	(Insuf)	.00000	.00000	.00000
Celula 9.Queue.NumberInQueue	.00000	(Insuf)	.00000	.00000	.00000
Celula 4.Queue.NumberInQueue	.17563	(Insuf)	.00000	2.0000	.00000
Celula 5.Queue.NumberInQueue	.00000	(Insuf)	.00000	.00000	.00000
Celula 6.Queue.NumberInQueue	.65552	(Insuf)	.00000	4.0000	.00000
Celula 1.Queue.NumberInQueue	.01593	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000

OUTPUTS

Identifier	Value
Inicio.NumberIn	27.000
Inicio.NumberOut	27.000
Maquina 1.NumberSeized	2.0000
Maquina 1.ScheduledUtilization	.73238
Maquina 2.NumberSeized	8.0000
Maquina 2.ScheduledUtilization	.63242
Maquina 3.NumberSeized	5.0000
Maquina 3.ScheduledUtilization	.55356
Maquina 4.NumberSeized	3.0000
Maquina 4.ScheduledUtilization	.67463
Maquina 5.NumberSeized	3.0000
Maquina 5.ScheduledUtilization	.48467
Maquina 6.NumberSeized	8.0000
Maquina 6.ScheduledUtilization	.73994
Maquina 7.NumberSeized	4.0000
Maquina 7.ScheduledUtilization	.64516
Maquina 8.NumberSeized	1.0000
Maquina 8.ScheduledUtilization	.59219
Maquina 9.NumberSeized	1.0000
Maquina 9.ScheduledUtilization	.57547
System.NumberOut	27.000

Simulation run time: 0.00 minutes.

Simulation run complete.

ANEXO 4. Report Modelo por lotes, orden menor tiempo total del lote con Set Up, colas LVA orden.

ARENA Simulation Results
Luis de Lara - License: STUDENT

Summary for Replication 1 of 1

Project: Modelo por lotes, orden menor tiempo total del lote con Set Up, colas LVA orden.

Analyst: Luis de Lara

Replication ended at time : 2511.0 Minutes

Base Time Units: Minutes

TALLY VARIABLES

Identifier	Average	Half Width	Minimum	Maximum	Observations
Inicio.VATime	523.62	(Insuf)	.00000	2380.0	27
Inicio.NVATime	.00000	(Insuf)	.00000	.00000	27
Inicio.WaitTime	305.59	(Insuf)	.00000	1036.0	27
Inicio.TranTime	.00000	(Insuf)	.00000	.00000	27
Inicio.OtherTime	.00000	(Insuf)	.00000	.00000	27
Inicio.TotalTime	829.22	(Insuf)	.00000	2511.0	27
Celula 2.Queue.WaitingTime	405.87	(Insuf)	.00000	981.00	8
Celula 7.Queue.WaitingTime	292.50	(Insuf)	.00000	735.00	4
Celula 3.Queue.WaitingTime	360.00	(Insuf)	.00000	994.00	5
Celula 8.Queue.WaitingTime	.00000	(Insuf)	.00000	.00000	1
Celula 9.Queue.WaitingTime	.00000	(Insuf)	.00000	.00000	1
Celula 4.Queue.WaitingTime	147.00	(Insuf)	.00000	334.00	3
Celula 5.Queue.WaitingTime	.00000	(Insuf)	.00000	.00000	3
Celula 6.Queue.WaitingTime	194.12	(Insuf)	.00000	549.00	8
Celula 1.Queue.WaitingTime	20.000	(Insuf)	.00000	40.000	2

DISCRETE-CHANGE VARIABLES

Identifier	Average	Half Width	Minimum	Maximum	Final Value
Inicio.WIP	8.9163	(Insuf)	.00000	27.000	.00000
Maquina 1.NumberBusy	.73238	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 1.NumberScheduled	1.0000	(Insuf)	1.0000	1.0000	1.0000
Maquina 1.Utilization	.73238	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 2.NumberBusy	.63242	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 2.NumberScheduled	1.0000	(Insuf)	1.0000	1.0000	1.0000
Maquina 2.Utilization	.63242	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 3.NumberBusy	.55356	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 3.NumberScheduled	1.0000	(Insuf)	1.0000	1.0000	1.0000
Maquina 3.Utilization	.55356	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 4.NumberBusy	.67463	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 4.NumberScheduled	1.0000	(Insuf)	1.0000	1.0000	1.0000
Maquina 4.Utilization	.67463	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 5.NumberBusy	.48467	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 5.NumberScheduled	1.0000	(Insuf)	1.0000	1.0000	1.0000
Maquina 5.Utilization	.48467	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 6.NumberBusy	.73994	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000

Maquina 6.NumberScheduled	1.0000	(Insuf)	1.0000	1.0000	1.0000
Maquina 6.Utilization	.73994	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 7.NumberBusy	.64516	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 7.NumberScheduled	1.0000	(Insuf)	1.0000	1.0000	1.0000
Maquina 7.Utilization	.64516	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 8.NumberBusy	.59219	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 8.NumberScheduled	1.0000	(Insuf)	1.0000	1.0000	1.0000
Maquina 8.Utilization	.59219	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 9.NumberBusy	.57547	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 9.NumberScheduled	1.0000	(Insuf)	1.0000	1.0000	1.0000
Maquina 9.Utilization	.57547	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Celula 2.Queue.NumberInQueue	1.2931	(Insuf)	.00000	4.0000	.00000
Celula 7.Queue.NumberInQueue	.46595	(Insuf)	.00000	3.0000	.00000
Celula 3.Queue.NumberInQueue	.71685	(Insuf)	.00000	4.0000	.00000
Celula 8.Queue.NumberInQueue	.00000	(Insuf)	.00000	.00000	.00000
Celula 9.Queue.NumberInQueue	.00000	(Insuf)	.00000	.00000	.00000
Celula 4.Queue.NumberInQueue	.17563	(Insuf)	.00000	2.0000	.00000
Celula 5.Queue.NumberInQueue	.00000	(Insuf)	.00000	.00000	.00000
Celula 6.Queue.NumberInQueue	.61848	(Insuf)	.00000	4.0000	.00000
Celula 1.Queue.NumberInQueue	.01593	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000

OUTPUTS

Identifier	Value
Inicio.NumberIn	27.000
Inicio.NumberOut	27.000
Maquina 1.NumberSeized	2.0000
Maquina 1.ScheduledUtilization	.73238
Maquina 2.NumberSeized	8.0000
Maquina 2.ScheduledUtilization	.63242
Maquina 3.NumberSeized	5.0000
Maquina 3.ScheduledUtilization	.55356
Maquina 4.NumberSeized	3.0000
Maquina 4.ScheduledUtilization	.67463
Maquina 5.NumberSeized	3.0000
Maquina 5.ScheduledUtilization	.48467
Maquina 6.NumberSeized	8.0000
Maquina 6.ScheduledUtilization	.73994
Maquina 7.NumberSeized	4.0000
Maquina 7.ScheduledUtilization	.64516
Maquina 8.NumberSeized	1.0000
Maquina 8.ScheduledUtilization	.59219
Maquina 9.NumberSeized	1.0000
Maquina 9.ScheduledUtilization	.57547
System.NumberOut	27.000

Simulation run time: 0.02 minutes.

Simulation run complete.

ANEXO 5. Report Modelo por lotes, orden menor tiempo total del lote con Set Up, colas LVA tiempo en estación.

ARENA Simulation Results
Luis de Lara - License: STUDENT

Summary for Replication 1 of 1

Project: Modelo por lotes, orden menor tiempo total del lote con Set Up, colas LVA tiempo en estación.

Analyst: Luis de Lara

Replication ended at time : 2380.0 Minutes

Base Time Units: Minutes

TALLY VARIABLES

Identifier	Average	Half Width	Minimum	Maximum	Observations
Inicio.VATime	523.62	(Insuf)	.00000	2380.0	27
Inicio.NVATime	.00000	(Insuf)	.00000	.00000	27
Inicio.WaitTime	261.92	(Insuf)	.00000	1127.0	27
Inicio.TranTime	.00000	(Insuf)	.00000	.00000	27
Inicio.OtherTime	.00000	(Insuf)	.00000	.00000	27
Inicio.TotalTime	785.55	(Insuf)	.00000	2380.0	27
Celula 2.Queue.WaitingTime	285.00	(Insuf)	.00000	1127.0	8
Celula 7.Queue.WaitingTime	262.50	(Insuf)	.00000	735.00	4
Celula 3.Queue.WaitingTime	352.20	(Insuf)	.00000	964.00	5
Celula 8.Queue.WaitingTime	.00000	(Insuf)	.00000	.00000	1
Celula 9.Queue.WaitingTime	.00000	(Insuf)	.00000	.00000	1
Celula 4.Queue.WaitingTime	147.00	(Insuf)	.00000	334.00	3
Celula 5.Queue.WaitingTime	.00000	(Insuf)	.00000	.00000	3
Celula 6.Queue.WaitingTime	187.50	(Insuf)	.00000	549.00	8
Celula 1.Queue.WaitingTime	20.000	(Insuf)	.00000	40.000	2

DISCRETE-CHANGE VARIABLES

Identifier	Average	Half Width	Minimum	Maximum	Final Value
Inicio.WIP	8.9117	(Insuf)	.00000	27.000	.00000
Maquina 1.NumberBusy	.77269	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 1.NumberScheduled	1.0000	(Insuf)	1.0000	1.0000	1.0000
Maquina 1.Utilization	.77269	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 2.NumberBusy	.66723	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 2.NumberScheduled	1.0000	(Insuf)	1.0000	1.0000	1.0000
Maquina 2.Utilization	.66723	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 3.NumberBusy	.58403	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 3.NumberScheduled	1.0000	(Insuf)	1.0000	1.0000	1.0000
Maquina 3.Utilization	.58403	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 4.NumberBusy	.71176	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 4.NumberScheduled	1.0000	(Insuf)	1.0000	1.0000	1.0000
Maquina 4.Utilization	.71176	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 5.NumberBusy	.51134	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 5.NumberScheduled	1.0000	(Insuf)	1.0000	1.0000	1.0000
Maquina 5.Utilization	.51134	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 6.NumberBusy	.78067	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000

Maquina 6.NumberScheduled	1.0000	(Insuf)	1.0000	1.0000	1.0000
Maquina 6.Utilization	.78067	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 7.NumberBusy	.68067	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 7.NumberScheduled	1.0000	(Insuf)	1.0000	1.0000	1.0000
Maquina 7.Utilization	.68067	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 8.NumberBusy	.62479	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 8.NumberScheduled	1.0000	(Insuf)	1.0000	1.0000	1.0000
Maquina 8.Utilization	.62479	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 9.NumberBusy	.60714	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 9.NumberScheduled	1.0000	(Insuf)	1.0000	1.0000	1.0000
Maquina 9.Utilization	.60714	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Celula 2.Queue.NumberInQueue	.95798	(Insuf)	.00000	4.0000	.00000
Celula 7.Queue.NumberInQueue	.44118	(Insuf)	.00000	3.0000	.00000
Celula 3.Queue.NumberInQueue	.73992	(Insuf)	.00000	4.0000	.00000
Celula 8.Queue.NumberInQueue	.00000	(Insuf)	.00000	.00000	.00000
Celula 9.Queue.NumberInQueue	.00000	(Insuf)	.00000	.00000	.00000
Celula 4.Queue.NumberInQueue	.18529	(Insuf)	.00000	2.0000	.00000
Celula 5.Queue.NumberInQueue	.00000	(Insuf)	.00000	.00000	.00000
Celula 6.Queue.NumberInQueue	.63025	(Insuf)	.00000	4.0000	.00000
Celula 1.Queue.NumberInQueue	.01681	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000

OUTPUTS

Identifier	Value
Inicio.NumberIn	27.000
Inicio.NumberOut	27.000
Maquina 1.NumberSeized	2.0000
Maquina 1.ScheduledUtilization	.77269
Maquina 2.NumberSeized	8.0000
Maquina 2.ScheduledUtilization	.66723
Maquina 3.NumberSeized	5.0000
Maquina 3.ScheduledUtilization	.58403
Maquina 4.NumberSeized	3.0000
Maquina 4.ScheduledUtilization	.71176
Maquina 5.NumberSeized	3.0000
Maquina 5.ScheduledUtilization	.51134
Maquina 6.NumberSeized	8.0000
Maquina 6.ScheduledUtilization	.78067
Maquina 7.NumberSeized	4.0000
Maquina 7.ScheduledUtilization	.68067
Maquina 8.NumberSeized	1.0000
Maquina 8.ScheduledUtilization	.62479
Maquina 9.NumberSeized	1.0000
Maquina 9.ScheduledUtilization	.60714
System.NumberOut	27.000

Simulation run time: 0.02 minutes.

Simulation run complete.

ANEXO 6. Report Modelo por lotes de transferencia unitaria, orden mayor prioridad, colas LVA orden.

ARENA Simulation Results

Project: Modelo por lotes de transferencia unitaria, orden mayor prioridad, colas LVA orden.

Analyst: Luis de Lara

Replication ended at time : 2233.0 Minutes

Base Time Units: Minutes

TALLY VARIABLES

Identifier	Average	Half Width	Minimum	Maximum	Observations
Inicio.VATime	30.384	(Corr)	.00000	89.000	465
Inicio.NVATime	.00000	.00000	.00000	.00000	465
Inicio.WaitTime	845.84	(Corr)	.00000	2217.0	465
Inicio.TranTime	.00000	.00000	.00000	.00000	465
Inicio.OtherTime	.00000	.00000	.00000	.00000	465
Inicio.TotalTime	876.22	(Corr)	.00000	2233.0	465
Celula 2.Queue.WaitingTime	75.175	(Insuf)	.00000	423.00	108
Almacen Maq 4.Queue.WaitingTime	59.456	(Insuf)	3.0000	107.00	149
Celula 7.Queue.WaitingTime	290.49	(Insuf)	.00000	865.00	91
Celula 3.Queue.WaitingTime	161.80	(Insuf)	.00000	414.00	99
Almacen Maq 5.Queue.WaitingTime	23.605	(Insuf)	1.0000	64.000	38
Celula 8.Queue.WaitingTime	726.87	(Insuf)	.00000	1449.0	39
Celula 9.Queue.WaitingTime	700.83	(Insuf)	.00000	1397.0	30
Almacen Maq 1.Queue.WaitingTime	62.034	(Insuf)	3.0000	316.00	29
Celula 4.Queue.WaitingTime	379.00	(Insuf)	.00000	1301.0	44
Almacen Maq 6.Queue.WaitingTime	56.252	21.490	2.0000	316.00	1480
Almacen Maq 2.Queue.WaitingTime	75.349	(Insuf)	.00000	316.00	286
Celula 5.Queue.WaitingTime	50.553	(Insuf)	.00000	298.00	56
Almacen Maq 7.Queue.WaitingTime	84.522	(Corr)	3.0000	316.00	628
Celula 6.Queue.WaitingTime	76.268	(Insuf)	.00000	286.00	108
Almacen Maq 8.Queue.WaitingTime	--	--	--	--	0
Celula 1.Queue.WaitingTime	863.61	(Insuf)	.00000	1760.0	47
Almacen Maq 3.Queue.WaitingTime	77.435	(Corr)	3.0000	280.00	718
Almacen Maq 9.Queue.WaitingTime	--	--	--	--	0

DISCRETE-CHANGE VARIABLES

Identifier	Average	Half Width	Minimum	Maximum	Final Value
Inicio.WIP	182.46	(Corr)	.00000	439.00	.00000
Maquina 1.NumberBusy	.82356	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 1.NumberScheduled	1.0000	(Insuf)	1.0000	1.0000	1.0000
Maquina 1.Utilization	.82356	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 2.NumberBusy	.71115	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 2.NumberScheduled	1.0000	(Insuf)	1.0000	1.0000	1.0000
Maquina 2.Utilization	.71115	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 3.NumberBusy	.62248	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 3.NumberScheduled	1.0000	(Insuf)	1.0000	1.0000	1.0000
Maquina 3.Utilization	.62248	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 4.NumberBusy	.75862	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 4.NumberScheduled	1.0000	(Insuf)	1.0000	1.0000	1.0000
Maquina 4.Utilization	.75862	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 5.NumberBusy	.54366	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 5.NumberScheduled	1.0000	(Insuf)	1.0000	1.0000	1.0000
Maquina 5.Utilization	.54366	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000

Maquina 6.NumberBusy	.82938	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 6.NumberScheduled	1.0000	(Insuf)	1.0000	1.0000	1.0000
Maquina 6.Utilization	.82938	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 7.NumberBusy	.72548	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 7.NumberScheduled	1.0000	(Insuf)	1.0000	1.0000	1.0000
Maquina 7.Utilization	.72548	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 8.NumberBusy	.66592	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 8.NumberScheduled	1.0000	(Insuf)	1.0000	1.0000	1.0000
Maquina 8.Utilization	.66592	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 9.NumberBusy	.64711	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 9.NumberScheduled	1.0000	(Insuf)	1.0000	1.0000	1.0000
Maquina 9.Utilization	.64711	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Celula 2.Queue.NumberInQueue	3.6359	(Insuf)	.00000	20.000	.00000
Almacen Maq 4.Queue.NumberInQueue	3.9673	(Insuf)	.00000	34.000	.00000
Celula 7.Queue.NumberInQueue	11.838	(Insuf)	.00000	43.000	.00000
Celula 3.Queue.NumberInQueue	7.1737	(Insuf)	.00000	34.000	.00000
Almacen Maq 5.Queue.NumberInQueue	.40170	(Insuf)	.00000	9.0000	.00000
Celula 8.Queue.NumberInQueue	12.695	(Insuf)	.00000	38.000	.00000
Celula 9.Queue.NumberInQueue	9.4155	(Insuf)	.00000	29.000	.00000
Almacen Maq 1.Queue.NumberInQueue	.80564	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Celula 4.Queue.NumberInQueue	7.4679	(Insuf)	.00000	22.000	.00000
Almacen Maq 6.Queue.NumberInQueue	37.283	(Insuf)	.00000	68.000	.00000
Almacen Maq 2.Queue.NumberInQueue	9.6506	(Insuf)	.00000	31.000	.00000
Celula 5.Queue.NumberInQueue	1.2678	(Insuf)	.00000	11.000	.00000
Almacen Maq 7.Queue.NumberInQueue	23.770	(Insuf)	.00000	47.000	.00000
Celula 6.Queue.NumberInQueue	3.6887	(Insuf)	.00000	36.000	.00000
Almacen Maq 8.Queue.NumberInQueue	.00000	(Insuf)	.00000	.00000	.00000
Celula 1.Queue.NumberInQueue	18.177	(Insuf)	.00000	45.000	.00000
Almacen Maq 3.Queue.NumberInQueue	24.898	(Insuf)	.00000	64.000	.00000
Almacen Maq 9.Queue.NumberInQueue	.00000	(Insuf)	.00000	.00000	.00000

OUTPUTS

Identifier	Value
Inicio.NumberIn	465.00
Inicio.NumberOut	465.00
Maquina 1.NumberSeized	47.000
Maquina 1.ScheduledUtilization	.82356
Maquina 2.NumberSeized	108.00
Maquina 2.ScheduledUtilization	.71115
Maquina 3.NumberSeized	99.000
Maquina 3.ScheduledUtilization	.62248
Maquina 4.NumberSeized	44.000
Maquina 4.ScheduledUtilization	.75862
Maquina 5.NumberSeized	56.000
Maquina 5.ScheduledUtilization	.54366
Maquina 6.NumberSeized	108.00
Maquina 6.ScheduledUtilization	.82938
Maquina 7.NumberSeized	91.000
Maquina 7.ScheduledUtilization	.72548
Maquina 8.NumberSeized	39.000
Maquina 8.ScheduledUtilization	.66592
Maquina 9.NumberSeized	30.000
Maquina 9.ScheduledUtilization	.64711
System.NumberOut	465.00

Simulation run time: 0.00 minutes.

ANEXO 7. Report Modelo por lotes de transferencia unitaria, orden mayor prioridad, colas LVA tiempo en estación.

ARENA Simulation Results

Project: Modelo por lotes de transferencia unitaria, orden mayor prioridad, colas LVA tiempo en estación.

Analyst: Luis de Lara

Replication ended at time : 1946.0 Minutes

Base Time Units: Minutes

TALLY VARIABLES

Identifier	Average	Half Width	Minimum	Maximum	Observations
Inicio.VATime	30.397	(Corr)	.00000	89.000	465
Inicio.NVATime	.00000	.00000	.00000	.00000	465
Inicio.WaitTime	697.47	(Corr)	.00000	1893.0	465
Inicio.TranTime	.00000	.00000	.00000	.00000	465
Inicio.OtherTime	.00000	.00000	.00000	.00000	465
Inicio.TotalTime	727.86	(Corr)	.00000	1946.0	465
Celula 2.Queue.WaitingTime	100.66	(Insuf)	.00000	543.00	108
Almacen Maq 4.Queue.WaitingTime	51.505	(Insuf)	3.0000	107.00	172
Celula 7.Queue.WaitingTime	290.49	(Insuf)	.00000	865.00	91
Celula 3.Queue.WaitingTime	161.80	(Insuf)	.00000	414.00	99
Almacen Maq 5.Queue.WaitingTime	18.933	(Insuf)	1.0000	64.000	45
Celula 8.Queue.WaitingTime	726.87	(Insuf)	.00000	1449.0	39
Celula 9.Queue.WaitingTime	700.83	(Insuf)	.00000	1397.0	30
Almacen Maq 1.Queue.WaitingTime	58.032	(Insuf)	.00000	302.00	31
Celula 4.Queue.WaitingTime	379.00	(Insuf)	.00000	1301.0	44
Almacen Maq 6.Queue.WaitingTime	46.582	13.001	.00000	302.00	484
Almacen Maq 2.Queue.WaitingTime	55.277	(Corr)	.00000	302.00	512
Celula 5.Queue.WaitingTime	50.017	(Insuf)	.00000	293.00	56
Almacen Maq 7.Queue.WaitingTime	55.559	17.826	.00000	302.00	867
Celula 6.Queue.WaitingTime	130.40	(Insuf)	.00000	562.00	108
Almacen Maq 8.Queue.WaitingTime	--	--	--	--	0
Celula 1.Queue.WaitingTime	863.61	(Insuf)	.00000	1760.0	47
Almacen Maq 3.Queue.WaitingTime	47.795	(Corr)	.00000	179.00	773
Almacen Maq 9.Queue.WaitingTime	--	--	--	--	0

DISCRETE-CHANGE VARIABLES

Identifier	Average	Half Width	Minimum	Maximum	Final Value
Inicio.WIP	173.92	(Corr)	.00000	439.00	.00000
Maquina 1.NumberBusy	.94502	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 1.NumberScheduled	1.0000	(Insuf)	1.0000	1.0000	1.0000
Maquina 1.Utilization	.94502	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 2.NumberBusy	.81603	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 2.NumberScheduled	1.0000	(Insuf)	1.0000	1.0000	1.0000
Maquina 2.Utilization	.81603	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 3.NumberBusy	.71429	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 3.NumberScheduled	1.0000	(Insuf)	1.0000	1.0000	1.0000
Maquina 3.Utilization	.71429	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 4.NumberBusy	.87050	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 4.NumberScheduled	1.0000	(Insuf)	1.0000	1.0000	1.0000
Maquina 4.Utilization	.87050	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 5.NumberBusy	.62384	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 5.NumberScheduled	1.0000	(Insuf)	1.0000	1.0000	1.0000
Maquina 5.Utilization	.62384	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000

Maquina 6.NumberBusy	.95478	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 6.NumberScheduled	1.0000	(Insuf)	1.0000	1.0000	1.0000
Maquina 6.Utilization	.95478	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 7.NumberBusy	.83248	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 7.NumberScheduled	1.0000	(Insuf)	1.0000	1.0000	1.0000
Maquina 7.Utilization	.83248	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 8.NumberBusy	.76413	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 8.NumberScheduled	1.0000	(Insuf)	1.0000	1.0000	1.0000
Maquina 8.Utilization	.76413	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 9.NumberBusy	.74255	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 9.NumberScheduled	1.0000	(Insuf)	1.0000	1.0000	1.0000
Maquina 9.Utilization	.74255	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Celula 2.Queue.NumberInQueue	5.5868	(Insuf)	.00000	31.000	.00000
Almacen Maq 4.Queue.NumberInQueue	4.5524	(Insuf)	.00000	34.000	.00000
Celula 7.Queue.NumberInQueue	13.584	(Insuf)	.00000	43.000	.00000
Celula 3.Queue.NumberInQueue	8.2317	(Insuf)	.00000	34.000	.00000
Almacen Maq 5.Queue.NumberInQueue	.43782	(Insuf)	.00000	9.0000	.00000
Celula 8.Queue.NumberInQueue	14.567	(Insuf)	.00000	38.000	.00000
Celula 9.Queue.NumberInQueue	10.804	(Insuf)	.00000	29.000	.00000
Almacen Maq 1.Queue.NumberInQueue	.92446	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Celula 4.Queue.NumberInQueue	8.5693	(Insuf)	.00000	22.000	.00000
Almacen Maq 6.Queue.NumberInQueue	11.585	(Insuf)	.00000	38.000	.00000
Almacen Maq 2.Queue.NumberInQueue	14.543	(Insuf)	.00000	33.000	.00000
Celula 5.Queue.NumberInQueue	1.4393	(Insuf)	.00000	11.000	.00000
Almacen Maq 7.Queue.NumberInQueue	24.753	(Insuf)	.00000	47.000	.00000
Celula 6.Queue.NumberInQueue	7.2374	(Insuf)	.00000	18.000	.00000
Almacen Maq 8.Queue.NumberInQueue	.00000	(Insuf)	.00000	.00000	.00000
Celula 1.Queue.NumberInQueue	20.858	(Insuf)	.00000	45.000	.00000
Almacen Maq 3.Queue.NumberInQueue	18.985	(Insuf)	.00000	64.000	.00000
Almacen Maq 9.Queue.NumberInQueue	.00000	(Insuf)	.00000	.00000	.00000

OUTPUTS

Identifier	Value
Inicio.NumberIn	465.00
Inicio.NumberOut	465.00
Maquina 1.NumberSeized	47.000
Maquina 1.ScheduledUtilization	.94502
Maquina 2.NumberSeized	108.00
Maquina 2.ScheduledUtilization	.81603
Maquina 3.NumberSeized	99.000
Maquina 3.ScheduledUtilization	.71429
Maquina 4.NumberSeized	44.000
Maquina 4.ScheduledUtilization	.87050
Maquina 5.NumberSeized	56.000
Maquina 5.ScheduledUtilization	.62384
Maquina 6.NumberSeized	108.00
Maquina 6.ScheduledUtilization	.95478
Maquina 7.NumberSeized	91.000
Maquina 7.ScheduledUtilization	.83248
Maquina 8.NumberSeized	39.000
Maquina 8.ScheduledUtilization	.76413
Maquina 9.NumberSeized	30.000
Maquina 9.ScheduledUtilization	.74255
System.NumberOut	465.00

Simulation run time: 0.00 minutes.

ANEXO 8. Report Modelo por lotes de transferencia unitaria, orden mayor prioridad, colas FIFO.

ARENA Simulation Results

Project: Modelo por lotes de transferencia unitaria, orden mayor prioridad, colas FIFO.

Analyst: Luis de Lara

Replication ended at time : 1942.0 Minutes

Base Time Units: Minutes

TALLY VARIABLES

Identifier	Average	Half Width	Minimum	Maximum	Observations
Inicio.VATime	30.384	(Corr)	.00000	89.000	465
Inicio.NVATime	.00000	.00000	.00000	.00000	465
Inicio.WaitTime	760.76	(Corr)	.00000	1893.0	465
Inicio.TranTime	.00000	.00000	.00000	.00000	465
Inicio.OtherTime	.00000	.00000	.00000	.00000	465
Inicio.TotalTime	791.15	(Corr)	.00000	1942.0	465
Celula 2.Queue.WaitingTime	137.10	(Insuf)	.00000	423.00	108
Almacen Maq 4.Queue.WaitingTime	51.505	(Insuf)	3.0000	107.00	172
Celula 7.Queue.WaitingTime	290.49	(Insuf)	.00000	865.00	91
Celula 3.Queue.WaitingTime	161.80	(Insuf)	.00000	414.00	99
Almacen Maq 5.Queue.WaitingTime	24.243	(Insuf)	3.0000	64.000	37
Celula 8.Queue.WaitingTime	726.87	(Insuf)	.00000	1449.0	39
Celula 9.Queue.WaitingTime	700.83	(Insuf)	.00000	1397.0	30
Almacen Maq 1.Queue.WaitingTime	54.515	(Insuf)	3.0000	163.00	33
Celula 4.Queue.WaitingTime	379.00	(Insuf)	.00000	1301.0	44
Almacen Maq 6.Queue.WaitingTime	50.539	(Corr)	1.0000	163.00	563
Almacen Maq 2.Queue.WaitingTime	59.836	(Corr)	.00000	163.00	427
Celula 5.Queue.WaitingTime	50.553	(Insuf)	.00000	298.00	56
Almacen Maq 7.Queue.WaitingTime	60.941	13.531	3.0000	163.00	871
Celula 6.Queue.WaitingTime	118.41	(Insuf)	.00000	377.00	108
Almacen Maq 8.Queue.WaitingTime	--	--	--	--	0
Celula 1.Queue.WaitingTime	863.61	(Insuf)	.00000	1760.0	47
Almacen Maq 3.Queue.WaitingTime	56.849	(Corr)	3.0000	128.00	978
Almacen Maq 9.Queue.WaitingTime	--	--	--	--	0

DISCRETE-CHANGE VARIABLES

Identifier	Average	Half Width	Minimum	Maximum	Final Value
Inicio.WIP	189.43	(Corr)	.00000	439.00	.00000
Maquina 1.NumberBusy	.94696	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 1.NumberScheduled	1.0000	(Insuf)	1.0000	1.0000	1.0000
Maquina 1.Utilization	.94696	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 2.NumberBusy	.81771	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 2.NumberScheduled	1.0000	(Insuf)	1.0000	1.0000	1.0000
Maquina 2.Utilization	.81771	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 3.NumberBusy	.71576	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 3.NumberScheduled	1.0000	(Insuf)	1.0000	1.0000	1.0000
Maquina 3.Utilization	.71576	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 4.NumberBusy	.87230	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 4.NumberScheduled	1.0000	(Insuf)	1.0000	1.0000	1.0000
Maquina 4.Utilization	.87230	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 5.NumberBusy	.62513	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 5.NumberScheduled	1.0000	(Insuf)	1.0000	1.0000	1.0000
Maquina 5.Utilization	.62513	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000

Maquina 6.NumberBusy	.95366	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 6.NumberScheduled	1.0000	(Insuf)	1.0000	1.0000	1.0000
Maquina 6.Utilization	.95366	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 7.NumberBusy	.83419	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 7.NumberScheduled	1.0000	(Insuf)	1.0000	1.0000	1.0000
Maquina 7.Utilization	.83419	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 8.NumberBusy	.76571	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 8.NumberScheduled	1.0000	(Insuf)	1.0000	1.0000	1.0000
Maquina 8.Utilization	.76571	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 9.NumberBusy	.74408	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Maquina 9.NumberScheduled	1.0000	(Insuf)	1.0000	1.0000	1.0000
Maquina 9.Utilization	.74408	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Celula 2.Queue.NumberInQueue	7.6246	(Insuf)	.00000	35.000	.00000
Almacen Maq 4.Queue.NumberInQueue	4.5617	(Insuf)	.00000	34.000	.00000
Celula 7.Queue.NumberInQueue	13.612	(Insuf)	.00000	43.000	.00000
Celula 3.Queue.NumberInQueue	8.2487	(Insuf)	.00000	34.000	.00000
Almacen Maq 5.Queue.NumberInQueue	.46189	(Insuf)	.00000	9.0000	.00000
Celula 8.Queue.NumberInQueue	14.597	(Insuf)	.00000	38.000	.00000
Celula 9.Queue.NumberInQueue	10.826	(Insuf)	.00000	29.000	.00000
Almacen Maq 1.Queue.NumberInQueue	.92636	(Insuf)	.00000	1.0000	.00000
Celula 4.Queue.NumberInQueue	8.5870	(Insuf)	.00000	22.000	.00000
Almacen Maq 6.Queue.NumberInQueue	14.651	(Insuf)	.00000	38.000	.00000
Almacen Maq 2.Queue.NumberInQueue	13.156	(Insuf)	.00000	37.000	.00000
Celula 5.Queue.NumberInQueue	1.4577	(Insuf)	.00000	11.000	.00000
Almacen Maq 7.Queue.NumberInQueue	27.332	(Insuf)	.00000	47.000	.00000
Celula 6.Queue.NumberInQueue	6.5854	(Insuf)	.00000	31.000	.00000
Almacen Maq 8.Queue.NumberInQueue	.00000	(Insuf)	.00000	.00000	.00000
Celula 1.Queue.NumberInQueue	20.901	(Insuf)	.00000	45.000	.00000
Almacen Maq 3.Queue.NumberInQueue	28.629	(Insuf)	.00000	64.000	.00000
Almacen Maq 9.Queue.NumberInQueue	.00000	(Insuf)	.00000	.00000	.00000

OUTPUTS

Identifier	Value
Inicio.NumberIn	465.00
Inicio.NumberOut	465.00
Maquina 1.NumberSeized	47.000
Maquina 1.ScheduledUtilization	.94696
Maquina 2.NumberSeized	108.00
Maquina 2.ScheduledUtilization	.81771
Maquina 3.NumberSeized	99.000
Maquina 3.ScheduledUtilization	.71576
Maquina 4.NumberSeized	44.000
Maquina 4.ScheduledUtilization	.87230
Maquina 5.NumberSeized	56.000
Maquina 5.ScheduledUtilization	.62513
Maquina 6.NumberSeized	108.00
Maquina 6.ScheduledUtilization	.95366
Maquina 7.NumberSeized	91.000
Maquina 7.ScheduledUtilization	.83419
Maquina 8.NumberSeized	39.000
Maquina 8.ScheduledUtilization	.76571
Maquina 9.NumberSeized	30.000
Maquina 9.ScheduledUtilization	.74408
System.NumberOut	465.00

Simulation run time: 0.00 minutes.

ANEXO 9. Registros de salidas de piezas en modelos de transferencia unitaria.

La columna primera (T) hace referencia al tipo de pieza, la segunda columna (O) al orden de entrada al sistema, la tercera columna (Nº) al número de pieza dentro del lote, la cuarta columna (D) al número de piezas dentro del lote y la última columna (M) al minuto exacto de salida de la pieza del sistema.

Tabla 16 Registro de salida de las piezas modelos por transferencia unitaria

Modelo piezas prioridad LVA (orden)					Modelo piezas prioridad LVA (T Proceso)					Modelo piezas prioridad FIFO				
T	O	Nº	D	M	T	O	Nº	D	M	T	O	N	D	M
18	9	1	10	16	18	9	1	10	16	18	9	1	10	16
5	2	1	10	17	5	2	1	10	17	5	2	1	10	17
2	1	1	35	18	2	1	1	35	18	2	1	1	35	18
9	3	1	10	21	9	3	1	10	21	9	3	1	10	21
3	8	1	44	25	3	8	1	44	25	3	8	1	44	25
5	2	2	10	27	5	2	2	10	27	5	2	2	10	27
2	1	2	35	30	2	1	2	35	30	2	1	2	35	30
18	9	2	10	32	18	9	2	10	32	18	9	2	10	32
5	2	3	10	37	5	2	3	10	37	5	2	3	10	37
9	3	2	10	38	9	3	2	10	38	9	3	2	10	38
2	1	3	35	42	2	1	3	35	42	2	1	3	35	42
9	4	1	46	44	9	4	1	46	44	9	4	1	46	44
3	8	2	44	45	3	8	2	44	45	3	8	2	44	45
5	2	4	10	47	5	2	4	10	47	5	2	4	10	47
18	9	3	10	48	18	9	3	10	48	18	9	3	10	48
2	1	4	35	54	2	1	4	35	54	2	1	4	35	54
17	12	1	2	55	17	12	1	2	55	17	12	1	2	55
9	3	3	10	55	9	3	3	10	55	9	3	3	10	55
5	2	5	10	57	5	2	5	10	57	5	2	5	10	57
18	9	4	10	64	18	9	4	10	64	18	9	4	10	64
3	8	3	44	65	3	8	3	44	65	3	8	3	44	65
2	1	5	35	66	2	1	5	35	66	2	1	5	35	66
5	2	6	10	67	5	2	6	10	67	5	2	6	10	67
9	3	4	10	72	9	3	4	10	72	9	3	4	10	72
5	2	7	10	77	5	2	7	10	77	5	2	7	10	77
2	1	6	35	78	2	1	6	35	78	2	1	6	35	78
18	9	5	10	80	18	9	5	10	80	18	9	5	10	80
9	4	2	46	83	9	4	2	46	83	9	4	2	46	83
3	8	4	44	85	3	8	4	44	85	3	8	4	44	85
5	2	8	10	87	5	2	8	10	87	5	2	8	10	87
9	3	5	10	89	9	3	5	10	89	9	3	5	10	89
2	1	7	35	90	2	1	7	35	90	2	1	7	35	90
18	9	6	10	96	18	9	6	10	96	18	9	6	10	96
5	2	9	10	97	5	2	9	10	97	5	2	9	10	97
2	1	8	35	102	2	1	8	35	102	2	1	8	35	102
3	8	5	44	105	3	8	5	44	105	3	8	5	44	105
9	3	6	10	106	9	3	6	10	106	9	3	6	10	106
5	2	10	10	107	5	2	10	10	107	5	2	10	10	107
17	12	2	2	110	17	12	2	2	110	17	12	2	2	110
18	9	7	10	112	18	9	7	10	112	18	9	7	10	112
2	1	9	35	114	2	1	9	35	114	2	1	9	35	114
9	4	3	46	122	9	4	3	46	122	9	4	3	46	122
9	3	7	10	123	9	3	7	10	123	9	3	7	10	123
3	8	6	44	125	3	8	6	44	125	3	8	6	44	125
2	1	10	35	126	2	1	10	35	126	2	1	10	35	126
18	9	8	10	128	18	9	8	10	128	18	9	8	10	128
6	19	1	39	130	6	19	1	39	130	6	19	1	39	130
6	18	1	11	134	6	18	1	11	134	6	18	1	11	134
2	1	11	35	138	2	1	11	35	138	2	1	11	35	138
9	3	8	10	140	9	3	8	10	140	9	3	8	10	140
18	9	9	10	144	18	9	9	10	144	18	9	9	10	144
3	8	7	44	145	3	8	7	44	145	3	8	7	44	145
6	19	2	39	147	6	19	2	39	147	6	19	2	39	147

2	1	12	35	150	2	1	12	35	150	2	1	12	35	150
6	18	2	11	154	6	18	2	11	154	6	18	2	11	154
9	3	9	10	157	9	3	9	10	157	9	3	9	10	157
18	9	10	10	160	18	9	10	10	160	18	9	10	10	160
9	4	4	46	161	9	4	4	46	161	9	4	4	46	161
2	1	13	35	162	2	1	13	35	162	2	1	13	35	162
6	19	3	39	164	6	19	3	39	164	6	19	3	39	164
3	8	8	44	165	3	8	8	44	165	3	8	8	44	165
2	1	14	35	174	17	10	1	3	172	17	10	1	3	172
6	18	3	11	174	2	1	14	35	174	2	1	14	35	174
9	3	10	10	174	6	18	3	11	174	6	18	3	11	174
6	19	4	39	181	9	3	10	10	174	9	3	10	10	174
3	8	9	44	185	6	19	4	39	181	6	19	4	39	181
2	1	15	35	186	17	10	2	3	184	17	10	2	3	184
3	7	1	6	190	3	8	9	44	185	3	8	9	44	185
6	18	4	11	194	2	1	15	35	186	2	1	15	35	186
1	6	1	30	196	3	7	1	6	190	3	7	1	6	190
2	1	16	35	198	6	18	4	11	194	6	18	4	11	194
9	4	5	46	200	17	10	3	3	196	17	10	3	3	196
3	7	2	6	201	2	1	16	35	198	2	1	16	35	198
3	8	10	44	205	9	4	5	46	200	9	4	5	46	200
2	1	17	35	210	3	7	2	6	201	3	7	2	6	201
3	7	3	6	212	3	8	10	44	205	3	8	10	44	205
6	19	5	39	212	2	1	17	35	210	2	1	17	35	210
6	18	5	11	214	3	7	3	6	212	3	7	3	6	212
2	1	18	35	222	6	19	5	39	212	6	19	5	39	212
3	7	4	6	223	6	18	5	11	214	6	18	5	11	214
3	8	11	44	225	2	1	18	35	222	2	1	18	35	222
1	6	2	30	227	3	7	4	6	223	3	7	4	6	223
6	18	6	11	234	3	8	11	44	225	3	8	11	44	225
3	7	5	6	234	6	18	6	11	234	6	18	6	11	234
2	1	19	35	234	3	7	5	6	234	3	7	5	6	234
9	4	6	46	239	2	1	19	35	234	2	1	19	35	234
3	7	6	6	245	9	4	6	46	239	9	4	6	46	239
3	8	12	44	245	3	7	6	6	245	3	7	6	6	245
2	1	20	35	246	3	8	12	44	245	3	8	12	44	245
6	19	6	39	250	2	1	20	35	246	2	1	20	35	246
6	18	7	11	254	6	19	6	39	250	6	19	6	39	250
1	6	3	30	258	6	18	7	11	254	6	18	7	11	254
2	1	21	35	258	2	1	21	35	258	2	1	21	35	258
3	8	13	44	265	12	21	1	14	263	3	8	13	44	265
2	1	22	35	270	3	8	13	44	265	2	1	22	35	270
6	18	8	11	274	2	1	22	35	270	6	18	8	11	274
9	4	7	46	278	6	18	8	11	274	9	4	7	46	278
2	1	23	35	282	12	21	2	14	276	2	1	23	35	282
3	8	14	44	285	9	4	7	46	278	3	8	14	44	285
16	11	1	12	288	2	1	23	35	282	16	11	1	12	288
6	19	7	39	288	3	8	14	44	285	6	19	7	39	288
1	6	4	30	289	6	19	7	39	288	2	1	24	35	294
2	1	24	35	294	12	21	3	14	289	6	18	9	11	294
6	18	9	11	294	2	1	24	35	294	3	8	15	44	305
3	8	15	44	305	6	18	9	11	294	2	1	25	35	306
2	1	25	35	306	12	21	4	14	302	6	18	10	11	314
6	18	10	11	314	3	8	15	44	305	9	4	8	46	317
9	4	8	46	317	2	1	25	35	306	2	1	26	35	318
2	1	26	35	318	6	18	10	11	314	3	8	16	44	325
1	6	5	30	320	12	21	5	14	315	6	19	8	39	326
3	8	16	44	325	9	4	8	46	317	16	11	2	12	326
6	19	8	39	326	2	1	26	35	318	2	1	27	35	330
16	11	2	12	326	3	8	16	44	325	6	18	11	11	334
2	1	27	35	330	6	19	8	39	326	2	1	28	35	342
6	18	11	11	334	12	21	6	14	328	3	8	17	44	345
2	1	28	35	342	2	1	27	35	330	2	1	29	35	354
3	8	17	44	345	6	18	11	11	334	9	4	9	46	356
1	6	6	30	351	12	21	7	14	341	16	11	3	12	364
2	1	29	35	354	2	1	28	35	342	6	19	9	39	364
9	4	9	46	356	3	8	17	44	345	3	8	18	44	365
16	11	3	12	364	12	21	8	14	354	2	1	30	35	366

6	19	9	39	364	2	1	29	35	354	2	1	31	35	378
3	8	18	44	365	9	4	9	46	356	3	8	19	44	385
2	1	30	35	366	6	19	9	39	364	2	1	32	35	390
2	1	31	35	378	3	8	18	44	365	9	4	10	46	395
1	6	7	30	382	2	1	30	35	366	14	23	1	23	396
3	8	19	44	385	12	21	9	14	367	7	24	1	10	397
2	1	32	35	390	2	1	31	35	378	6	19	10	39	402
9	4	10	46	395	12	21	10	14	380	16	11	4	12	402
14	23	1	23	396	3	8	19	44	385	2	1	33	35	402
6	19	10	39	402	2	1	32	35	390	3	8	20	44	405
16	11	4	12	402	12	21	11	14	393	7	24	2	10	410
2	1	33	35	402	9	4	10	46	395	2	1	34	35	414
3	8	20	44	405	14	23	1	23	396	7	24	3	10	423
2	1	34	35	414	7	24	1	10	397	3	8	21	44	425
1	6	8	30	420	2	1	33	35	402	2	1	35	35	426
3	8	21	44	425	6	19	10	39	402	9	4	11	46	434
2	1	35	35	426	3	8	20	44	405	7	24	4	10	436
9	4	11	46	434	12	21	12	14	406	6	19	11	39	440
6	19	11	39	440	7	24	2	10	410	16	11	5	12	440
16	11	5	12	440	2	1	34	35	414	3	8	22	44	445
3	8	22	44	445	12	21	13	14	419	7	24	5	10	449
14	23	2	23	455	7	24	3	10	423	14	23	2	23	455
3	8	23	44	465	3	8	21	44	425	7	24	6	10	462
1	6	9	30	468	2	1	35	35	426	3	8	23	44	465
4	13	1	10	471	12	21	14	14	432	4	13	1	10	471
9	4	12	46	473	9	4	11	46	434	9	4	12	46	473
16	11	6	12	478	7	24	4	10	436	7	24	7	10	475
6	19	12	39	478	6	19	11	39	440	6	19	12	39	478
3	8	24	44	485	3	8	22	44	445	16	11	6	12	478
3	8	25	44	505	7	24	5	10	449	3	8	24	44	485
4	13	2	10	511	14	23	2	23	455	7	24	8	10	488
9	4	13	46	512	14	22	1	13	456	7	24	9	10	501
14	23	3	23	514	7	24	6	10	462	3	8	25	44	505
6	19	13	39	516	3	8	23	44	465	4	13	2	10	511
16	11	7	12	516	9	4	12	46	473	9	4	13	46	512
1	6	10	30	516	7	24	7	10	475	7	24	10	10	514
3	8	26	44	525	14	22	2	13	476	14	23	3	23	514
3	8	27	44	545	6	19	12	39	478	6	19	13	39	516
9	4	14	46	551	3	8	24	44	485	16	11	7	12	516
4	13	3	10	551	7	24	8	10	488	3	8	26	44	525
16	11	8	12	554	14	22	3	13	496	15	26	1	8	530
6	19	14	39	554	7	24	9	10	501	3	8	27	44	545
1	6	11	30	564	3	8	25	44	505	15	26	2	8	546
3	8	28	44	565	9	4	13	46	512	9	4	14	46	551
14	23	4	23	573	7	24	10	10	514	4	13	3	10	551
3	8	29	44	585	14	23	3	23	514	16	11	8	12	554
9	4	15	46	590	6	19	13	39	516	6	19	14	39	554
4	13	4	10	591	14	22	4	13	516	15	26	3	8	562
6	19	15	39	592	3	8	26	44	525	3	8	28	44	565
16	11	9	12	592	15	26	1	8	530	14	23	4	23	573
3	8	30	44	605	14	22	5	13	536	15	26	4	8	578
1	6	12	30	612	3	8	27	44	545	3	8	29	44	585
3	8	31	44	625	15	26	2	8	546	9	4	15	46	590
9	4	16	46	629	9	4	14	46	551	4	13	4	10	591
6	19	16	39	630	6	19	14	39	554	6	19	15	39	592
16	11	10	12	630	14	22	6	13	556	16	11	9	12	592
4	13	5	10	631	15	26	3	8	562	15	26	5	8	594
14	23	5	23	632	3	8	28	44	565	3	8	30	44	605
3	8	32	44	645	14	23	4	23	573	15	26	6	8	610
1	6	13	30	660	14	22	7	13	576	3	8	31	44	625
3	8	33	44	665	15	26	4	8	578	15	26	7	8	626
6	19	17	39	668	3	8	29	44	585	9	4	16	46	629
16	11	11	12	668	9	4	15	46	590	6	19	16	39	630
9	4	17	46	668	6	19	15	39	592	16	11	10	12	630
4	13	6	10	671	15	26	5	8	594	4	13	5	10	631
3	8	34	44	685	14	22	8	13	596	14	23	5	23	632
14	23	6	23	691	3	8	30	44	605	15	26	8	8	642
3	8	35	44	705	15	26	6	8	610	3	8	32	44	645

16	11	12	12	706	14	22	9	13	616	3	8	33	44	665
6	19	18	39	706	3	8	31	44	625	6	19	17	39	668
9	4	18	46	707	15	26	7	8	626	16	11	11	12	668
1	6	14	30	708	9	4	16	46	629	9	4	17	46	668
4	13	7	10	711	6	19	16	39	630	4	13	6	10	671
3	8	36	44	725	14	23	5	23	632	1	6	1	30	678
14	22	1	13	730	14	22	10	13	636	3	8	34	44	685
6	19	19	39	744	15	26	8	8	642	14	23	6	23	691
3	8	37	44	745	3	8	32	44	645	3	8	35	44	705
9	4	19	46	746	10	25	1	30	654	16	11	12	12	706
14	22	2	13	750	14	22	11	13	656	6	19	18	39	706
14	23	7	23	750	10	25	2	30	660	9	4	18	46	707
4	13	8	10	751	3	8	33	44	665	1	6	2	30	709
1	6	15	30	756	10	25	3	30	666	4	13	7	10	711
3	8	38	44	765	9	4	17	46	668	12	21	14	14	724
14	22	3	13	770	6	19	17	39	668	3	8	36	44	725
6	19	20	39	782	10	25	4	30	672	12	21	1	14	737
3	8	39	44	785	14	22	12	13	676	1	6	3	30	740
9	4	20	46	785	10	25	5	30	678	6	19	19	39	744
14	22	4	13	790	10	25	6	30	684	3	8	37	44	745
4	13	9	10	791	3	8	34	44	685	9	4	19	46	746
1	6	16	30	804	10	25	7	30	690	14	23	7	23	750
3	8	40	44	805	14	23	6	23	691	12	21	2	14	750
14	23	8	23	809	14	22	13	13	696	4	13	8	10	751
14	22	5	13	810	10	25	8	30	696	12	21	3	14	763
6	19	21	39	820	10	25	9	30	702	3	8	38	44	765
9	4	21	46	824	3	8	35	44	705	1	6	4	30	771
3	8	41	44	825	6	19	18	39	706	12	21	4	14	776
14	22	6	13	830	8	16	21	21	706	6	19	20	39	782
4	13	10	10	831	9	4	18	46	707	3	8	39	44	785
3	8	42	44	845	10	25	10	30	708	9	4	20	46	785
14	22	7	13	850	8	16	1	21	712	12	21	5	14	789
1	6	17	30	852	10	25	11	30	714	4	13	9	10	791
6	19	22	39	858	8	16	2	21	718	12	21	6	14	802
9	4	22	46	863	10	25	12	30	720	1	6	5	30	802
3	8	43	44	865	8	16	3	21	724	3	8	40	44	805
14	23	9	23	868	3	8	36	44	725	14	23	8	23	809
14	22	8	13	870	10	25	13	30	726	12	21	7	14	815
3	8	44	44	885	8	16	4	21	730	6	19	21	39	820
14	22	9	13	890	10	25	14	30	732	9	4	21	46	824
6	19	23	39	896	8	16	5	21	736	3	8	41	44	825
1	6	18	30	900	10	25	15	30	738	12	21	8	14	828
9	4	23	46	902	8	16	6	21	742	4	13	10	10	831
14	22	10	13	910	10	25	16	30	744	1	6	6	30	833
14	23	10	23	927	6	19	19	39	744	12	21	9	14	841
14	22	11	13	930	3	8	37	44	745	3	8	42	44	845
6	19	24	39	934	9	4	19	46	746	12	21	10	14	854
9	4	24	46	941	8	16	7	21	748	6	19	22	39	858
1	6	19	30	948	10	25	17	30	750	9	4	22	46	863
14	22	12	13	950	14	23	7	23	750	1	6	7	30	864
14	22	13	13	970	8	16	8	21	754	3	8	43	44	865
6	19	25	39	972	8	16	9	21	760	12	21	11	14	867
11	14	1	25	979	10	25	18	30	760	14	23	9	23	868
9	4	25	46	980	3	8	38	44	765	12	21	12	14	880
11	14	2	25	986	8	16	10	21	766	3	8	44	44	885
14	23	11	23	986	8	16	11	21	772	12	21	13	14	893
11	14	3	25	993	10	25	19	30	773	1	6	8	30	895
1	6	20	30	996	8	16	12	21	778	6	19	23	39	896
11	14	4	25	1000	6	19	20	39	782	9	4	23	46	902
11	14	5	25	1007	8	16	13	21	784	14	22	1	13	917
6	19	26	39	1010	3	8	39	44	785	1	6	9	30	926
11	14	6	25	1014	9	4	20	46	785	14	23	10	23	927
9	4	26	46	1019	10	25	20	30	786	6	19	24	39	934
11	14	7	25	1021	8	16	14	21	790	14	22	2	13	937
11	14	8	25	1028	8	16	15	21	796	9	4	24	46	941
1	6	21	30	1044	10	25	21	30	799	1	6	10	30	957
11	14	9	25	1045	8	16	16	21	802	14	22	3	13	957
14	23	12	23	1045	3	8	40	44	805	6	19	25	39	972

6	19	27	39	1048	8	16	17	21	808	14	22	4	13	977
9	4	27	46	1058	14	23	8	23	809	9	4	25	46	980
11	14	10	25	1062	10	25	22	30	812	14	23	11	23	986
11	14	11	25	1079	8	16	18	21	814	1	6	11	30	988
6	19	28	39	1086	8	16	19	21	820	14	22	5	13	997
1	6	22	30	1092	6	19	21	39	820	6	19	26	39	1010
11	14	12	25	1096	9	4	21	46	824	14	22	6	13	1017
9	4	28	46	1097	10	25	23	30	825	1	6	12	30	1019
14	23	13	23	1104	3	8	41	44	825	9	4	26	46	1019
11	14	13	25	1113	8	16	20	21	826	14	22	7	13	1037
6	19	29	39	1124	10	25	24	30	838	14	23	12	23	1045
11	14	14	25	1130	3	8	42	44	845	6	19	27	39	1048
9	4	29	46	1136	10	25	25	30	851	1	6	13	30	1050
1	6	23	30	1140	6	19	22	39	858	14	22	8	13	1057
11	14	15	25	1147	9	4	22	46	863	9	4	27	46	1058
6	19	30	39	1162	10	25	26	30	864	14	22	9	13	1077
14	23	14	23	1163	3	8	43	44	865	1	6	14	30	1081
11	14	16	25	1164	14	23	9	23	868	6	19	28	39	1086
9	4	30	46	1175	16	11	1	12	869	9	4	28	46	1097
11	14	17	25	1181	10	25	27	30	877	14	22	10	13	1097
1	6	24	30	1188	3	8	44	44	885	14	23	13	23	1104
11	14	18	25	1198	10	25	28	30	890	1	6	15	30	1112
6	19	31	39	1200	6	19	23	39	896	14	22	11	13	1117
9	4	31	46	1214	9	4	23	46	902	6	19	29	39	1124
11	14	19	25	1215	10	25	29	30	903	9	4	29	46	1136
14	23	15	23	1222	16	11	2	12	907	14	22	12	13	1137
11	14	20	25	1232	10	25	30	30	916	1	6	16	30	1143
1	6	25	30	1236	14	23	10	23	927	14	22	13	13	1157
6	19	32	39	1238	6	19	24	39	934	6	19	30	39	1162
11	14	21	25	1249	9	4	24	46	941	14	23	14	23	1163
9	4	32	46	1253	16	11	3	12	945	8	16	21	21	1167
11	14	22	25	1266	1	6	1	30	952	8	16	1	21	1173
6	19	33	39	1276	6	19	25	39	972	1	6	17	30	1174
14	23	16	23	1281	9	4	25	46	980	9	4	30	46	1175
11	14	23	25	1283	1	6	2	30	983	8	16	2	21	1179
1	6	26	30	1284	16	11	4	12	983	8	16	3	21	1185
9	4	33	46	1292	14	23	11	23	986	8	16	4	21	1191
11	14	24	25	1300	6	19	26	39	1010	8	16	5	21	1197
6	19	34	39	1314	1	6	3	30	1014	6	19	31	39	1200
11	14	25	25	1317	9	4	26	46	1019	8	16	6	21	1203
8	16	21	21	1327	16	11	5	12	1021	1	6	18	30	1205
9	4	34	46	1331	4	13	1	10	1030	8	16	7	21	1209
1	6	27	30	1332	1	6	4	30	1045	9	4	31	46	1214
8	16	1	21	1333	14	23	12	23	1045	8	16	8	21	1215
8	16	2	21	1339	6	19	27	39	1048	8	16	9	21	1221
14	23	17	23	1340	9	4	27	46	1058	14	23	15	23	1222
8	16	3	21	1345	16	11	6	12	1059	8	16	10	21	1227
8	16	4	21	1351	4	13	2	10	1070	8	16	11	21	1233
6	19	35	39	1352	1	6	5	30	1076	1	6	19	30	1236
8	16	5	21	1357	6	19	28	39	1086	6	19	32	39	1238
8	16	6	21	1363	9	4	28	46	1097	8	16	12	21	1239
8	16	7	21	1369	16	11	7	12	1097	8	16	13	21	1245
9	4	35	46	1370	14	23	13	23	1104	8	16	14	21	1251
8	16	8	21	1375	1	6	6	30	1107	9	4	32	46	1253
1	6	28	30	1380	4	13	3	10	1110	8	16	15	21	1257
8	16	9	21	1381	6	19	29	39	1124	8	16	16	21	1263
8	16	10	21	1387	16	11	8	12	1135	1	6	20	30	1267
6	19	36	39	1390	9	4	29	46	1136	8	16	17	21	1269
8	16	11	21	1393	1	6	7	30	1138	8	16	18	21	1275
8	16	12	21	1399	4	13	4	10	1150	6	19	33	39	1276
14	23	18	23	1399	6	19	30	39	1162	14	23	16	23	1281
8	16	13	21	1405	14	23	14	23	1163	8	16	19	21	1281
9	4	36	46	1409	1	6	8	30	1169	8	16	20	21	1287
8	16	14	21	1411	16	11	9	12	1173	9	4	33	46	1292
8	16	15	21	1417	9	4	30	46	1175	11	14	1	25	1296
8	16	16	21	1423	4	13	5	10	1190	1	6	21	30	1298
6	19	37	39	1428	1	6	9	30	1200	11	14	2	25	1303
1	6	29	30	1428	6	19	31	39	1200	11	14	3	25	1310

8	16	17	21	1429	16	11	10	12	1211	6	19	34	39	1314
8	16	18	21	1435	9	4	31	46	1214	11	14	4	25	1317
8	16	19	21	1441	14	23	15	23	1222	11	14	5	25	1324
8	16	20	21	1447	4	13	6	10	1230	1	6	22	30	1329
9	4	37	46	1448	1	6	10	30	1231	11	14	6	25	1331
14	23	19	23	1458	6	19	32	39	1238	9	4	34	46	1331
6	19	38	39	1466	16	11	11	12	1249	11	14	7	25	1338
1	6	30	30	1476	9	4	32	46	1253	14	23	17	23	1340
9	4	38	46	1487	1	6	11	30	1262	11	14	8	25	1345
17	10	1	3	1488	4	13	7	10	1270	11	14	9	25	1352
17	10	2	3	1500	6	19	33	39	1276	6	19	35	39	1352
6	19	39	39	1504	14	23	16	23	1281	11	14	10	25	1359
17	10	3	3	1512	16	11	12	12	1287	1	6	23	30	1360
14	23	20	23	1517	9	4	33	46	1292	11	14	11	25	1366
9	4	39	46	1526	1	6	12	30	1293	9	4	35	46	1370
8	17	1	15	1536	11	14	1	25	1296	11	14	12	25	1373
11	15	3	3	1547	11	14	2	25	1303	11	14	13	25	1380
8	17	2	15	1565	11	14	3	25	1310	11	14	14	25	1387
9	4	40	46	1565	4	13	8	10	1310	6	19	36	39	1390
14	23	21	23	1576	6	19	34	39	1314	1	6	24	30	1391
11	15	1	3	1577	11	14	4	25	1317	11	14	15	25	1394
8	17	3	15	1594	11	14	5	25	1324	14	23	18	23	1399
9	4	41	46	1604	1	6	13	30	1324	11	14	16	25	1401
11	15	2	3	1607	11	14	6	25	1331	11	14	17	25	1408
8	17	4	15	1623	9	4	34	46	1331	9	4	36	46	1409
14	23	22	23	1635	11	14	7	25	1338	11	14	18	25	1415
13	20	1	7	1642	14	23	17	23	1340	11	14	19	25	1422
9	4	42	46	1643	11	14	8	25	1345	1	6	25	30	1422
8	17	5	15	1652	4	13	9	10	1350	6	19	37	39	1428
13	20	2	7	1659	11	14	9	25	1352	11	14	20	25	1429
13	20	3	7	1676	6	19	35	39	1352	11	14	21	25	1436
8	17	6	15	1681	1	6	14	30	1355	11	14	22	25	1443
9	4	43	46	1682	11	14	10	25	1359	9	4	37	46	1448
13	20	4	7	1693	11	14	11	25	1366	11	14	23	25	1450
14	23	23	23	1694	9	4	35	46	1370	1	6	26	30	1453
13	20	5	7	1710	11	14	12	25	1373	11	14	24	25	1457
8	17	7	15	1710	11	14	13	25	1380	14	23	19	23	1458
9	4	44	46	1721	1	6	15	30	1386	11	14	25	25	1464
13	20	6	7	1727	11	14	14	25	1387	6	19	38	39	1466
8	17	8	15	1739	6	19	36	39	1390	1	6	27	30	1484
13	20	7	7	1744	4	13	10	10	1390	9	4	38	46	1487
9	4	45	46	1760	11	14	15	25	1394	6	19	39	39	1504
12	21	1	14	1762	14	23	18	23	1399	1	6	28	30	1515
8	17	9	15	1768	11	14	16	25	1401	14	23	20	23	1517
12	21	2	14	1775	11	14	17	25	1408	9	4	39	46	1526
12	21	3	14	1788	9	4	36	46	1409	8	17	1	15	1536
8	17	10	15	1797	11	14	18	25	1415	1	6	29	30	1546
9	4	46	46	1799	1	6	16	30	1417	8	17	2	15	1565
12	21	4	14	1801	11	14	19	25	1422	9	4	40	46	1565
7	24	1	10	1808	6	19	37	39	1428	14	23	21	23	1576
12	21	5	14	1814	11	14	20	25	1429	1	6	30	30	1577
7	24	2	10	1821	11	14	21	25	1436	10	25	30	30	1583
8	17	11	15	1826	11	14	22	25	1443	10	25	1	30	1589
12	21	6	14	1827	1	6	17	30	1448	8	17	3	15	1594
7	24	3	10	1834	9	4	37	46	1448	10	25	2	30	1595
1	5	1	1	1839	11	14	23	25	1450	10	25	3	30	1601
12	21	7	14	1840	11	14	24	25	1457	9	4	41	46	1604
7	24	4	10	1847	14	23	19	23	1458	10	25	4	30	1607
12	21	8	14	1853	11	14	25	25	1464	10	25	5	30	1613
8	17	12	15	1855	6	19	38	39	1466	10	25	6	30	1619
7	24	5	10	1860	1	6	18	30	1479	8	17	4	15	1623
12	21	9	14	1866	13	20	7	7	1486	10	25	7	30	1625
7	24	6	10	1873	9	4	38	46	1487	10	25	8	30	1631
12	21	10	14	1879	13	20	1	7	1503	14	23	22	23	1635
8	17	13	15	1884	6	19	39	39	1504	10	25	9	30	1637
7	24	7	10	1886	1	6	19	30	1510	13	20	1	7	1642
12	21	11	14	1892	14	23	20	23	1517	10	25	10	30	1643
7	24	8	10	1899	13	20	2	7	1520	9	4	42	46	1643

12	21	12	14	1905	9	4	39	46	1526	10	25	11	30	1649
7	24	9	10	1912	8	17	1	15	1536	8	17	5	15	1652
8	17	14	15	1913	13	20	3	7	1537	10	25	12	30	1655
12	21	13	14	1918	1	6	20	30	1541	13	20	2	7	1659
7	24	10	10	1925	13	20	4	7	1554	10	25	13	30	1661
10	25	30	30	1931	9	4	40	46	1565	10	25	14	30	1667
12	21	14	14	1931	8	17	2	15	1565	10	25	15	30	1673
10	25	1	30	1937	13	20	5	7	1571	13	20	3	7	1676
8	17	15	15	1942	1	6	21	30	1572	10	25	16	30	1679
10	25	2	30	1943	14	23	21	23	1576	8	17	6	15	1681
10	25	3	30	1949	13	20	6	7	1588	9	4	43	46	1682
10	25	4	30	1955	8	17	3	15	1594	10	25	17	30	1685
10	25	5	30	1961	1	6	22	30	1603	10	25	18	30	1691
10	25	6	30	1967	9	4	41	46	1604	13	20	4	7	1693
10	25	7	30	1973	8	17	4	15	1623	14	23	23	23	1694
10	25	8	30	1979	1	6	23	30	1634	10	25	19	30	1697
10	25	9	30	1985	14	23	22	23	1635	10	25	20	30	1703
10	25	10	30	1991	9	4	42	46	1643	10	25	21	30	1709
10	25	11	30	1997	8	17	5	15	1652	13	20	5	7	1710
10	25	12	30	2003	1	6	24	30	1665	8	17	7	15	1710
10	25	13	30	2009	8	17	6	15	1681	10	25	22	30	1715
10	25	14	30	2015	9	4	43	46	1682	10	25	23	30	1721
10	25	15	30	2021	14	23	23	23	1694	9	4	44	46	1721
10	25	16	30	2027	1	6	25	30	1696	10	25	24	30	1727
10	25	17	30	2033	8	17	7	15	1710	13	20	6	7	1727
10	25	18	30	2039	9	4	44	46	1721	10	25	25	30	1733
10	25	19	30	2045	1	6	26	30	1727	10	25	26	30	1739
10	25	20	30	2051	8	17	8	15	1739	8	17	8	15	1739
10	25	21	30	2057	1	6	27	30	1758	13	20	7	7	1744
10	25	22	30	2063	9	4	45	46	1760	10	25	27	30	1745
10	25	23	30	2069	8	17	9	15	1768	10	25	28	30	1751
10	25	24	30	2075	1	6	28	30	1789	10	25	29	30	1757
10	25	25	30	2081	8	17	10	15	1797	9	4	45	46	1760
10	25	26	30	2087	9	4	46	46	1799	8	17	9	15	1768
10	25	27	30	2093	1	6	29	30	1820	11	15	3	3	1792
10	25	28	30	2099	8	17	11	15	1826	8	17	10	15	1797
10	25	29	30	2105	1	5	1	1	1839	9	4	46	46	1799
15	26	1	8	2121	1	6	30	30	1851	11	15	1	3	1822
15	26	2	8	2137	8	17	12	15	1855	8	17	11	15	1826
15	26	3	8	2153	8	17	13	15	1884	1	5	1	1	1839
15	26	4	8	2169	11	15	3	3	1886	11	15	2	3	1852
15	26	5	8	2185	8	17	14	15	1913	8	17	12	15	1855
15	26	6	8	2201	11	15	1	3	1916	8	17	13	15	1884
15	26	7	8	2217	8	17	15	15	1942	8	17	14	15	1913
15	26	8	8	2233	11	15	2	3	1946	8	17	15	15	1942

